Rippelmarken.

Inaugural-Dissertation

von

Dr. Ernst Bertololy,
Kgl. Reallehrer.

Frankenthal.
Druck von Louis Göhring & Co.
1894.

Rippelmarken.

Inaugural-Dissertation

von

Dr. Ernst Bertololy,
Kgl. Reallehrer.

Frankenthal.
Druck von Louis Göhring & Co.
1894.

Gedruckt mit Genehmigung der philosophischen Fakultät
zu Giessen.

Referent: Herr **Professor Dr. W. Sievers.**

Seinen lieben Eltern

in

Dankbarkeit gewidmet

vom

Verfasser.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41538127_0027

Vorwort.

Die Anregung zur Bearbeitung dieses Themas verdankt Verfasser seinem ehemaligen Lehrer, Herrn Professor Dr. S. Günther, der ihn zugleich auf einige litterarische Hilfsmittel aufmerksam machte. Verfasser erlaubt sich daher, seinem verehrlichen Lehrer, Herrn Professor Dr. S. Günther, für seine Güte und sein Wohlwollen den besten Dank hiermit auszusprechen.

Rippelmarken.

Bis vor wenigen Jahren war in geologischen Kreisen bei der Beurteilung der innerafrikanischen Wüste, ihres Charakters und ihrer Entstehung die Ansicht massgebend, dass die Sahara der Boden eines diluvialen Meeres sei, eine Ansicht, die sich heutzutage in der Laienwelt noch zu halten vermag. *von Zittels* und *Walthers* neuere Untersuchungen haben diese Hypothese in jüngster Zeit in Frage gestellt.

Um mit der alten Theorie von der Entstehung der Sahara zu brechen, galt es zunächst jene Belege, welche die Anhänger derselben für ihre Ansicht bisher ins Feld führten, näher zu prüfen und auf das richtige Mass ihrer Glaubwürdigkeit zu beschränken. Vor allen Dingen wurden unter anderem[1]) die gewaltigen Sandanhäufungen in der Sahara als Beweis für die Existenz eines Diluvialmeeres angeführt. *Walther*, der im Jahre 1887 die Sinaihalbinsel und die Galalawüste bereiste und demnach die Wüste aus eigener Anschauung kennen gelernt hat, unterzieht die bisherige Entstehungstheorie der Sahara einer scharfen Kritik und kommt auf Grund eingehender Untersuchungen zu dem Resultate, dass der Wüstencharakter aus der Wüste selbst zu erklären sei, dass die Bildung des Sandes nichts zu thun habe mit einem diluvialen Meere, dass dieser vielmehr seine Entstehung den metereologischen Kräften verdanke, die heute noch in der Wüste wirksam sind.

[1]) Afrika. Eine allgemeine Landeskunde von Sievers. S. 117.

Vor allem ist der schroffe Temperaturwechsel, dem die Gesteinsmassen der Sahara unterworfen sind, ein wesentlicher Faktor, welcher die Bildung des Sandes verursacht und an der Gestaltung der Wüste gearbeitet hat. Infolge der täglichen Insolation werden die Gesteine der Sahara stark erhitzt, während sich nach Sonnenuntergang ein Temperaturausgleich zwischen dem Boden und der erkaltenden Luft bis zum frühen Morgen naturgemäss vollziehen muss. Die wechselnde Temperatur bewirkt nun, dass die erhitzten Gesteine sich am Tage sehr stark ausdehnen, des Nachts aber wieder zusammenziehen. Es ist zudem, da sich die Sonnenstrahlen nur bis zu einer verhältnismässig geringen Tiefe geltend machen, kein Zweifel, dass die Gesteinsmassen an ihrer Oberfläche stärker erwärmt werden, wie dies im Innern der Fall sein dürfte. Da die meisten Gesteinsarten aus verschiedenen Gemengteilen bestehen, denen ein verschiedener Ausdehnungscoëfficient zukommt, so ist es naheliegend, dass die tägliche Insolation einerseits, die Abkühlung bei Nacht andererseits von nicht unbedeutendem Einflusse auf die Morphologie des felsigen Bodens sein muss. Vor allem wird die Cohäsion der einzelnen Teilchen eines und desselben Gesteines in Frage gestellt. Jedes Gestein dehnt sich infolge seiner ungleichmässigen Erwärmung, infolge seiner heterogenen Bestandteile in seinen einzelnen Teilen verschieden aus, so dass durch den immerwährenden, sich stets erneuernden Prozess, den die wechselnden Temperaturverhältnisse einleiten, ein Lockern des ganzen Gefüges und Aufbaus stattfindet. Das Gestein zerspringt und zerbröckelt und ist somit, wenn nicht der einzige, so doch der wichtigste Sandbildner in der Wüste. Der Verwitterung unter dem Einflusse von atmosphärischer Luft und Feuchtigkeit ist bei der Zersetzung des Gesteins ebenfalls eine nicht unbedeutende Rolle zuzuweisen. Der Wind übernimmt in der

Wüste vorzugsweise den Transport des zerbröckelten und verwitterten Gesteines, indem er im allgemeinen den Sand gleichmässig zu verteilen strebt. So sind also dieselben Faktoren, welche im Laufe von unzähligen Jahren die Fels- und Steinwüste zur Sandwüste umgestaltet haben, heute noch thätig, indem sie den vor Jahrtausenden eingeleiteten Prozess weiterführen, bis alle Niveauunterschiede in der Felswüste verschwunden sind. Der Wüstensand verdankt seine Entstehung demnach der Wüste selbst und den in ihr herrschenden Kräften. Es fehlt keineswegs an gründlichen Beobachtungen, welche diesen Vorgang als zweifellos erscheinen lassen, so dass ein Diluvialmeer uns nicht erst die gewaltigen innerafrikanischen Sandanhäufungen zu erklären braucht. *Walther* führt in seinem Werke[2]) „Die Denudation in der Wüste und ihre geologische Bedeutung“ eine Reihe von Zeugnissen glaubwürdiger Autoren an, die beweisen, dass der Sand der Wüste thatsächlich das Zerstörungsprodukt der zutage streichenden Gesteinsschichten bildet. *Zittel*,[3]) der sich eingehend mit der Erforschung der östlichen Sahara beschäftigte, kam ebenfalls auf Grund geologischer Untersuchungen zu dem Resultate, dass der Sand in der östlichen Sahara seine Entstehung der Verwitterung des dortigen Gesteins verdankt.

Die Wirkung der Insolation macht sich nun nach *Walther* besonders beim Granit bemerkbar, da sie sich, sozusagen, bei jedem Mineralkrystall individualisiert, sobald das Gestein sich in seine mineralogischen Elemente: Quarzkörner, Feldspathkrystalle und Glimmer oder Hornblende zerlegt. Der Transport dieser Bestandteile des Granits erfolgt sehr ungleichmässig, indem vor allem das

---

[2]) Bd. XVI der Abhandlungen der math. physik. Klasse der Kgl. Sächs. Ges. d. Wiss.

[3]) v. Richthofen „Führer f. Forschungsreisende“. S. 443.

spezifische Gewicht derselben in Frage kommt. Die feinen Glimmerteilchen, die sich zudem leicht in feinen Staub zerreiben, werden sich am weitesten von ihrem Ursprungsgebiete entfernen und erst da haften bleiben, wo die Vegetation der Steppe oder feuchter Untergrund sie zu halten vermag. Auf diese Weise wird eine äolische Auslese der einzelnen Sand- und Staubteile stattfinden, so dass sich der Sand der Wüste wesentlich von dem des Meeres unterscheidet.

In der Wüste erfolgt der Transport vorzugsweise in einer horizontalen Componente, in der Richtung der vorherrschenden Winde; im Meere macht sich die transportierende Thätigkeit der Welle bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne geltend. Allerdings muss zugegeben werden, dass Küstenströme, welche ihre Entstehung der schief auflaufenden Welle verdanken, eine seitliche Verschiebung der Sandmassen bewirken, eine Thatsache, die *Weule*[4]) mit Recht hervorhebt. Sonst wird die Welle allein keinen Transport auf grössere Strecken zuwege bringen, da die Orbitalbahnen der Wasserteilchen geschlossene, mehr oder minder ovale Linien bilden, und da die suspendierten Teilchen in der Richtung derselben sich hin- und herschieben. Sobald der Wellenschlag nachlässt, werden sich zunächst die groben Sandkörner niederschlagen, alsdann die feineren, so dass es auf diesem Wege nie zu einer Auslese, nie zu einer Sonderung der grobkörnigen Sandteile von den feineren Schlammteilchen kommen kann. Der Meeressand ist daher niemals rein, während der Wüstensand ausgeblasen und gereinigt ist.

Diesen tiefgreifenden Unterschied konnte *Walther* des öfteren konstatieren. Je weiter der Sand von der

[4]) „Beiträge zur Morphologie der Flachküsten". Zeitschrift für wissenschaftl. Geogr. Bd. VIII, Weimar 1891.

Küste entfernt war, desto mehr ähnelte er dem Wüstensande. „Ich habe“, so schreibt *Walther,* „seit einer Reihe von Jahren eingehende Untersuchungen an vielen Küsten angestellt und Hunderte von Grundproben der litoralen Sedimente entnommen, aber bis jetzt ist mir noch nicht ein Fall bekannt geworden, dass der reine Quarzsand, welcher die Dünenzüge oder den Sandstrand an einer Küste bildet, sich auch am Meeresgrunde finde.“ Der Unterschied zwischen Wüsten- und Meeressand ist allerdings kein Beweis dafür, dass die Sahara niemals den Boden eines diluvialen Meeres bildete — denn die Sonderung der groberen und feineren Teilchen hätte nach der Trockenlegung des Saharameeres eben so gut stattfinden können — vielmehr soll dieser thatsächlich bestehende Unterschied nur die Behauptung widerlegen, welche von Gelehrten und Laien bisher als Beweis für ein diluviales Saharameer aufgestellt wurde, und die darin gipfelte, dass der Wüstensand eben wegen seiner Reinheit rein gewaschener Meeressand sei. An einen Trugschluss reihen sich gar zu leicht andere Trugschlüsse an, indem man oft auf einer, wenn auch falsch verstandenen Thatsache weiterbaut und andere Thatsachen mit ihr, der ersteren, in Beziehung bringt.

So wurden, wie auch *Walther* hervorhebt, fossile Rippelmarken (engl. „Ripple-marks“, franz. „Rides“) — der Name „Wellenfurchen“ oder „Wellenspuren“ würde die Entstehung dieser Erscheinung wesentlich beschränken, der Ausdruck „Sand- oder Schlammfurchen“ ihr Vorkommen auf sandigem, respektive schlammigem Boden einseitig begrenzen — ob in der Wüste oder sonstwo, stets als Beweis einer marinen Bildung angesehen, wiewohl ihr Vorkommen über dem Meeresstrande, sogar in der Wüste hinreichend konstatiert wurde. Es ist bis jetzt noch nicht erwiesen, dass den fossilen Rippelmarken ausschliesslich eine marine Bildung zukommt, wiewohl

solches stets angenommen wurde. *Lyell*,[5]) *Walther*, *John Rae*[6]) u. a. haben aeolische Rippeln konstatiert, und es wäre immerhin denkbar, dass gewisse fossile Rippeln keine marine Ablagerungen vorstellen, dass sie vielmehr ihre Entstehung zunächst dem Winde verdanken und alsdann unter dem Einflusse von Kieselsäure und atmosphärischer Feuchtigkeit erhärtet und fossil geworden. *Walther* hat fossiles Holz, das von Kieselsäure durchdrungen war, in der Wüste aufgefunden, und *Middendorf*[7]) weiss zu erzählen, dass eine Düne in Ferghana schichtenweise mit einer Lösskrust, die unter der Einwirkung des Regens verhärtete, überzogen war und beim Wandern 5 Schichtenköpfe hinterliess.

Und trotzdem wurden fossile Rippelmarken stets als Beweis einer marinen Bildung angeführt, und man baute auf dieser Hypothese weitere Folgerungen auf. Man gelangte zu dem Schlusse, dass Wind und Wogen, welche die fossilen Rippelmarken erzeugten, ungefähr von derselben Stärke gewesen, wie sie es heutzutage sind, man schloss aus der Grösse der Rippeln auf eine mehr oder minder heftige Wellenbewegung, respektive auf die Tiefe, in welcher sich gewisse, mit Sandfurchen versehene Sandsteine abgelagert haben, und folgerte schliesslich aus der Verteilung und dem Streichen der fossilen Rippelmarken, welche Richtung dem Winde, der zunächst die Wellen und durch diese die Wellenfurchen dann erzeugte, zukam. Dabei hat man bis in unsere Zeit die Frage nach der Entstehung der Rippelmarken keineswegs einer gründlichen Untersuchung gewürdigt, so dass es stets sehr fraglich blieb, ob diese Erscheinung auch wirklich als das Resultat der Wellenbewegung, die sich an Flachküsten bis zum Meeresboden fortsetzen

[5]) „Elements of Geology", 6th Ed. London 1865. S. 19—21.
[6]) Nature, Bd. XXIX, S. 357.
[7]) Mem. de l'Acad. Impér. de St. Petersb. XXIX. 1. p. 91.

kann, aufzufassen ist. Man war sich ferner nicht recht klar darüber, wie die Welle überhaupt ihre Wirkung auf diesen Flachboden äussert, ob sie es allein ist, welche die Rippeln erzeugt, ob nicht noch andere Faktoren in Betracht kommen, und ob schliesslich nicht mehrere Entstehungsarten dieser Erscheinung denkbar wären.

I. Rippelmarken im Experimente.

1) Entstehung der Rippelmarken.

Es möge hier der Versuch gemacht werden, die Entstehungsursachen der Rippelmarken, ihr Abhängigkeitsverhältnis von der Stärke, Richtung der sie bildenden Faktoren und ihre Eigenschaften auf Grund der neueren Forschungen näher zu beleuchten.

Die Franzosen *M. C. de Candolle*[8]) und *F. A. Forel,*[9]) die Engländer *A. R. Hunt*[10]) und *G. H. Darwin*[11]) haben sich eingehender mit diesen Fragen beschäftigt, indem sie zum Teil zahlreiche Experimente zur Erklärung der in der Natur vorkommenden Erscheinungen dieser Art zu Hilfe zogen und die in der Natur beobachteten Vorgänge mit diesen Experimenten in Einklang zu bringen strebten.

Aus den Experimenten geht hervor, dass Rippel-

[8]) „Rides formées à la surface du sable déposé au fond de l'eau et autres phénomènes analogues". Bibl. univ. de Génève 1883. Archives d. scien. phys. et natur. III. pér. IX tome p. 241—278.

[9]) „Les rides de fond étudiées dans le Lac Léman." Ebenda tome X. und Bull. de la Soc. Vaudoise des scienc. natur. Volume XV Lausanne 1879 p. 66.

[10]) „On the Formation of Ripplemark". Proceed. of the Roy. Soc. of London. Vol. XXXIV.

[11]) On the form. of Ripplemark in Sand." Proc. of the Roy. Soc. of London Vol. XXXVI und Nature, Bd. XXIX p. 163 ff.

marken mit verschiedenen Flüssigkeiten, den verschiedensten pulverisierten Stoffen auf verschiedene Arten gebildet werden können. Die gewöhnliche Art, Rippelmarken zu erzeugen, war bei oben erwähnten Experimentalphysikern die, dass das Gefäss in Schwingungen versetzt wurde. Auf diese Weise entstanden stehende (uninodale) Wellen, welche bei genügender Amplitude sofort diese Erscheinung hervorriefen. Nicht nur allein auf diesem Wege, sondern auch auf dem Wege der Rotation können Rippelmarken leicht gebildet werden. Wenn man ein cylindrisches Gefäss, dessen Boden mit Sand bedeckt ist, über dem eine Wasserschicht sich befindet, um seine vertikale Längsachse rotieren lässt, indem man es auf eine drehbare, horizontale Scheibe stellt, so tritt die Erscheinung ebenfalls zu Tage. Es entstehen radial verlaufende Rippeln. Dabei ist zu bemerken, dass Rippelmarken erzeugt werden, ob man in demselben Sinne mit alternierender Geschwindigkeit dreht, oder ob man die Rotation bald in diesem, bald in jenem Sinne erfolgen lässt. Allerdings besitzen die so entstandenen Rippeln verschiedene Eigenschaften, von denen später die Rede sein soll.

De Candolles Experimente, die er auf die mannigfaltigste Art umgestaltete, beweisen, dass es vor allem auf die Reibung der Flüssigkeit an der betreffenden rippelbildenden Materie, also auf die Adhäsion beider ankommt: „Il faut que la poussière forme avec le liquide un mélange doué d'une certaine viscosité, ce qui exige qu'il y ait adhésion entre eux.“ Die Ausdrücke „viscosité, visqueux, visqueuse“ sind nicht im wörtlichen Sinne zu nehmen, wenn *de Candolle* von der „Klebrigkeit“ des Sandes oder pulverisierter Stoffe spricht. *De Candolle* wird, wie auch *Darwin*[12]) vermutet, die Eigen-

[12]) On the form of Ripplemark. S. 37.

schaft eines pulverisierten Stoffes oder einer Flüssigkeit, die darin besteht, dass die einzelnen Teilchen der betreffenden Materie zwar verschiebbar sind, aber immerhin einer noch merklichen, inneren Reibung bei der Veränderung ihrer Lage begegnen, mit diesen Ausdrücken belegen.

Es kommt also bei der Erzeugung von Rippeln bei der furchenbildenden Substanz und ihrer zugehörigen Flüssigkeit die Grösse ihrer gegenseitigen Adhäsion und der innere Reibungswiderstand der Masse in Betracht. *De Candolle* liefert den Beweiss für verschiedene Sandarten, ferner für reine Kieselsäure, Barium- und Magnesiumkarbonat, zerriebenes Glas, Schwefel, Eisen, Kupfer u. a. m. Ferner verwandte *de Candolle* die verschiedensten Flüssigkeiten, sogar zähklebrige, wie Obstsaft, Teer, Blut u. s. w. Interessant ist es, dass es ihm sogar gelang, mit 2 Flüssigkeiten (ohne pulverisierte Substanz) Rippelmarken herzustellen, indem sich diese stets auf der Flüssigkeit von der grösseren Cohäsion bildeten; so waren z. B. die Runzeln bei Anwendung von Teer und Wasser auf ersterem ganz deutlich erkennbar. Quecksilber und Wasser waren weniger zu dem Experimente geeignet. Sobald aber ein Pulver z. B. Bariumcarbonat zwischen beide Flüssigkeiten, die allzu wenig verschieden in Bezug auf ihre Klebrigkeit (viscosité) sind, gebracht wurde, bildeten sich Rippeln. Dass diese Erscheinung, das Zustandekommen von Rippelmarken, wirklich auf lokale Reibung zwischen beiden Versuchsmaterien zurückzuführen ist, dafür spricht der Umstand, dass *de Candolle* mit Hilfe pulverisierten Korkes in hermetisch verschlossenen Fläschchen, die vollständig mit Wasser gefüllt waren und um ihre horizontale Längsachse gedreht wurden, an der Oberfläche dieser Flüssigkeit kleine Korkrippeln herzustellen vermochte. Dasselbe beweisen ferner die Sandfurchen, die

sich auf einer Glasplatte bildeten, die um ihren Mittelpunkt unter Wasser in eine horizontale Rotation versetzt wurde. Auf der mit Sand bedeckten Oberfläche der Glasplatte fand eine lokale Reibung der Sandteilchen, die die Bewegung der Platte mitzumachen strebten, an dem in Ruhe befindlichen Wasser statt; es bildeten sich daher radial gelagerte Sandrippeln, während der Boden des Gefässes, der ebenfalls mit Sand bedeckt und der Platte ziemlich nahe war, keine aufzuweisen hatte.

Wie soeben angedeutet, wird die Reibung zwischen beiden, bei der Bildung der Rippeln in Anwendung kommenden Stoffen, wie beispielsweise zwischen Wasser und Sand dadurch erzeugt, dass der Sand beim Balancieren (Schaukeln) des Gefässes dem Wasser gegenüber in relativ geringer Bewegung sich befindet. Der Sand macht nur die minimalen Bewegungen des Bodens mit, während das Wasser grösseren Schwankungen ausgesetzt wird. Bei der Bildung der Rotationsrippeln tritt der umgekehrte Fall ein. Das Gefäss wird in Drehung versetzt; der Sand am Boden macht, da er am Boden des Gefässes haftet, die Bewegung desselben mit, während das Wasser noch eine Zeit lang in Ruhe bleibt. Wird alsdann im entgegengesetzten Sinne gedreht, so behält das Wasser noch eine Zeit lang vermöge der Beharrung die ihm erteilte Geschwindigkeit bei, während das Gefäss und der am Boden befindliche Sand die entgegengesetzte Rotationsrichtung bereits angenommen haben, so dass in diesem Falle eine intensivere Reibung stattfindet. Reibung, allerdings von geringerer Intensität, wird auch durch die Bewegung des Gefässes in einem und demselben Sinne erzeugt, sobald die Bewegung bald rascher, bald langsamer vor sich geht. Bei spezifisch leichteren Versuchsobjekten, wie Kork, bilden sich naturgemäss die Rippeln oben, denn die Korkstückchen haften bei einem ganz gefüllten und verschlossenen Gefässe

oben am Verschlusse desselben, dem ja dieselbe Bewegung wie jenem eigen ist, während dem Wasser anfangs eine geringere Geschwindigkeit, bei plötzlicher Veränderung der Drehungsrichtung sogar eine entgegengesetzte Rotation innewohnt. Es findet demnach ebenfalls eine lokale Reibung statt, welche die Entstehung kleiner Korkrippeln bewirkt.

Bei allen Versuchen, die *de Candolle* anstellte, ergab es sich, dass die Rippelmarken stets senkrecht zur Bewegungsrichtung verliefen. Genauere Messungen führten endlich zu dem Resultate, dass die Grösse derselben, d. h. ihre Entfernung von Kamm zu Kamm proportional der Reibung war. Diejenige Reibung nun, die entsteht, wenn das Gefäss stets nach derselben Richtung, aber mit wechselnder Geschwindigkeit[13]) gedreht wird, nennt *de Candolle* „frottement intermittent", die Reibung, die auf wechselnder Drehungsrichtung beruht, belegt er mit dem Ausdrucke „frottement oscillatoire". Auf Grund seiner zahlreichen Experimente gelangt *de Candolle* schliesslich zu dem Fundamentalsatze: „Lorsqu'une matière visqueuse en contact avec un liquide moins visqueux qu'elle-même, éprouve un frottement oscillatoire ou intermittent, résultant du mouvement de la couche liquide qui la recouvre, ou de son propre déplacement relativement à cette couche,

1) la surface de la matière visqueuse se ride perpendiculairement à la direction de ce frottement et
2) l'intervalle compris entre les rides ainsi formées,

[13]) In der Natur ist es keineswegs erforderlich, dass die Reibung in einem und demselben Sinne an Intensität wechseln muss. Im Kaltenbrunner Bache bei Neustadt a. H. habe ich Rippeln zerstört, die sich nach kurzem wieder bildeten. Hier kann doch kaum von einer variabeln Stromgeschwindigkeit die Rede sein.

autrement dit leur écartement, est en raison directe de l'amplitude du frottement."

Die Reibung allein vermag uns jedoch das Zustandekommen von parallelen Rippeln nicht zu erklären, es müsste denn sein, dass die Reibung, d. h. die Adhäsion zwischen beiden Versuchsmaterien an manchen Stellen intensiver auftritt, so dass der Sand daselbst nicht liegen bleibt, während er anderswo, an Stellen, die einer relativ geringeren Reibung ausgesetzt wären, angehäuft würde. Es ist nun, besonders bei den Rotationsrippeln nicht einzusehen, weshalb in bestimmten Abständen (die Entfernung der Rippeln ist ziemlich gleich) die Reibung bald ein Maximum, bald ein Minimum erreichen soll. Mit Hilfe von Wasser konnte *de Candolle* den eigentlichen Vorgang, wie sich nämlich die einzelnen Sandkörner zu Rippeln vereinigen, nicht feststellen. Er nahm daher Teer, eine Flüssigkeit, die eine langsamere, d. h. eine, zur Beobachtung geeignetere Entstehung der Rippelmarken gestattete, indem die Klebrigkeit des Teers den sich bildenden Rippeln zwischen zwei aufeinander folgenden Oscillationen nicht Zeit zum Nivellieren liess.

Mit Hilfe dieser Flüssigkeit war es *de Candolle* möglich, festzustellen, dass der Vorgang identisch sei mit dem, der sich abspielt, wenn der Wind beispielsweise über die Oberfläche des Wassers dahinstreicht und Falten, d. h. Wellen erzeugt. Dieser Vergleich scheint nicht gerade glücklich gewählt zu sein; denn der Wind weht in derselben Richtung, so dass bei diesem Vorgange von einer oscillierenden Reibung kaum die Rede sein kann, höchstens von einer intermittierenden. Ausserdem pflanzen sich die Wellen, wenngleich die einzelnen Wasserteilchen sich nur wenig aus ihrer ursprünglichen Lage entfernen, dennoch ihrer Form nach fort, indem ein Flüssigkeitsteilchen das andere anstösst und in Schwingungen versetzt, ein Umstand, der doch bei den durch

Reibung entstehenden Rippeln nicht in Betracht kommen dürfte. Durch die Fortpflanzung der Wellenform können bekanntlich auch Wellen erzeugt werden, die weit entfernt von dem Wirkungskreise des Windes auftreten und wirksam werden, also da, wo eine lokale Reibung zwischen Wind und Wasser nicht mehr stattfindet, eine Erscheinung, wie sie bei der Dünung uns entgegentritt, wie sie aber bei der Entstehung der Rippeln kaum vorkommt. *De Candolle*, der die Entstehung von Rippelmarken auf lokale Reibung zurückführt, erklärt den physikalischen Vorgang, der dabei in Frage kommt, keineswegs in absolut befriedigender Weise; denn Reibung allein kann noch keine parallelen Furchen und Falten erzeugen. Wie der Wind, wenn er über eine Wasserfläche vollständig horizontal dahinstreicht, eine Strömung erwecken muss, indem die in Bewegung begriffenen Luftteilchen durch ihre Adhäsion an den Wasserteilchen diese bewegen und verschieben, wie er aber unter dieser Voraussetzung allein noch keine Welle[14]) erzeugen wird, ebenso wenig haben die Rippeln ihr Dasein der Reibung allein zu verdanken. Der Wind wird nur in dem Falle Wogen ins Leben rufen, wenn er unter einem beliebigen Winkel die Wasserfläche trifft und die Gleichgewichtslage der Wasserteilchen stört, so dass dieselben so lange hin- und herpendeln, bis der frühere Zustand der Gleichgewichtslage wieder hergestellt ist. Demnach muss noch eine andere Kraft in Wirksamkeit treten, die bei der Bildung der Rippelmarken beteiligt ist.

Candolle benutzte nun zur Bildung seiner Wellenfurchen stehende Wellen mit mehreren Knoten. Er vermochte diese mit Hilfe einer Schaufel, welche im Wasser hin- und herbewegt wurde, ins Leben zu rufen. Ein

[14]) Man kann sich leicht von diesem Vorgang überzeugen, wenn man horizontal über eine mit Sägmehl bestreute Wasserfläche einen Luftzug streichen lässt.

Versuch *de Candolles*, in einem grossen Bassin gewöhnliche Fortpflanzungswogen su erzeugen und diese auf seine, in dem Bassin befindliche Experimentierrinne zu übertragen — ein Versuch, der den Vorgängen in der Natur näher kommt — war erfolglos, da die Wellen in der Rinne, sobald sie gross genug waren, um ihre Wirkung am Boden derselben zu äussern, an den Wänden reflektiert und in stehende Wellen umgesetzt wurden.[15]) Daher gestatten die Experimente *de Candolles* keinen weiteren Schlusse bezüglich des bei der Rippelbildung in Betracht zu ziehenden Vorgangs.

Darwin hat nun den physikalischen Vorgang, der bei der Bildung von Rippelmarken zu berücksichtigen ist, sehr eingehend untersucht. Seine Versuche beruhen auf stehenden Wellen, die er durch Schaukeln einer Wellenrinne erzeugte. *Darwin* versichert wiederholt, dass er die grösste Sorgfalt angewendet habe, um zu definitiven Resultaten zu gelangen, und wahrlich, es bedarf nicht erst einer derartigen Versicherung, um *Darwin* volles Vertrauen zu schenken; denn seine Experimente sind wirklich mit der grössten Sorgfalt und Exaktheit durchgeführt.

Wenn eine Wassermasse durch Schaukeln ihre Wellenrinne in uninodale Schwingungen versetzt wird, werden zunächst die einzelnen Sandteilchen, die eine Reibung durch die sie berührenden, in Bewegung begriffenen Wasserteilchen erleiden, eine Ortsveränderung bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne erfahren.

---

[15]) Krümmel (Handbuch der Ozeanographie, 2. Bd, S. 33) ist der Ansicht, dass die Bildung der Wellenfurchen, wie sie sich in der Natur auf dem Meeresboden vollzieht, in absoluter Übereinstimmung mit dem Vorgange in der Natur sich im Experimente kaum nachahmen lasse, da die Wellenrinne einen festen Untergrund besitzt, während der Meeresboden doch mehr oder minder beweglich und elastisch erscheint.

Da, wo am Boden die Körnchen wegen einer zufälligen, ganz unbedeutenden Erhebung, sei es, dass ein grösseres Korn liegen geblieben, oder dass kleinere Körnchen etwas fester mit einander verklebt waren, eine grössere Reibung auf ihrem Wege zu überwinden haben, wird zuvorderst ein Ansammeln ganz unbedeutender Spuren von Sand stattfinden, die den Widerstand nach und nach vergrössern. „Die Anhäufung ist," so schreibt *Darwin*, „zunächst durch die Reibung am Boden bedingt, und sobald ein Körnchen liegen bleibt, vermehrt es die Reibung an diesem Platze." Wie sich nun eine derartige, ganz unbedeutende Erhebung allmählich zu einer vollkommenen Wellenfurche auswächst, konnte *Darwin* nicht wohl konstatieren, da solches bei dem in Bewegung befindlichen Wasser und den embryonalen Vorgängen trotz der grössten Sorgfalt, trotz vielfach wiederholter Versuche nicht möglich war. Soviel liess sich indessen konstatieren, dass die in Betracht kommenden Vorgänge, d. h. die Bewegungserscheinungen der Wasserteilchen im Anfangsstadium der Rippelbildung dieselben waren, wie die, welche sich abspielten, wenn die Rippelmarken bereits gebildet waren, und eine äusserst langsame Oscillation des Wassers noch stattfand. „Es scheinen dabei dieselben Bewegungsarten aufzutreten, welche bei langsamer Oscillation über bereits gebildeten Rippelmarken vorhanden sind, und deshalb ist es wahrscheinlich, dass die Bewegungserscheinungen in beiden Fällen derselben Art sind."

Darwin operierte mit Tintentröpfchen, die er mittelst einer zugespitzten Glasröhre auf den Gipfel bereits gebildeter Wellenfurchen brachte. Aus der Veränderung der Tintenschicht schloss *Darwin* auf die Strömungen, welche bei der Entstehung der Rippeln wirksam sind. Es ergab sich, dass sich am Kamme der Rippelmarken zu beiden Seiten eine Wirbelbewegung geltend machte,

auf deren Ergründung und Wirkung *Darwin* seine ganze Sorgfalt verwandte.

Die minimalen Sandanhäufungen im Anfangsstadium der Rippelbildung sind, wie bereits erwähnt, zunächst auf die Reibung der beiden Versuchsobjekte, z. B. des Wassers und Sandes zurückzuführen, ferner auf die des Sandes an seiner Unterlage. Bringt man nämlich einen Tropfen Tinte auf den gläsernen Boden einer Wellenrinne, so macht derselbe zwar die Bewegung der Wassermassen mit, aber er bildet keine Rippelmarke, weil die Reibung an seiner Unterlage zu geringfügig ist. Anders verhält es sich jedoch, wenn der Tropfen auf den Kamm einer ausgebildeten Wellenfurche gebracht wird und daselbst haften bleibt. Er bildet daselbst bei langsamer Oscillation eine dünne Schicht über der Wellenfurche und macht genau die Bewegungen dieser mit. Diese Bewegung gleicht ganz und gar der Bewegungsart, wie sie *Darwin* beim Anfangsstadium der Wellenfurchen über einer kleinen Sandanhäufung, die ebenfalls mit einem Tintentröpfchen gekrönt war, jedoch bei stärkerer Oscillation konstatieren konnte, nur waren, wie bereits angedeutet, die einzelnen Vorgänge im Entstehungsprozesse der Rippeln nicht so deutlich ersichtlich, wie bei der ausgewachsenen Wellenfurche, über der eine minimale Oscillation stattfand.

Deshalb bildete *Darwin* Rippelmarken, brachte einen Tropfen geeigneter Tinte auf deren Kamm, setzte die darüber befindliche Wassermasse in mässige Bewegung und beobachtete die Veränderung des Tintentröpfchens.

Sobald die Oscillation, die im Verhältnis zur Höhe der ausgebildeten Wellenfurche aus den oben erwähnten Gründen klein sein muss, begann, bildete der Tintentropfen eine Schicht, die bald dicker, bald dünner wurde, je nachdem die Richtung der Bewegung des Wassers

sich veränderte. Figur 3 auf Seite 25 der Darwinschen Abhandlung zeigt die Veränderung. Die Tintenschicht nahm die Gestalt eines Pilzschwammes an, dessen Stiel sich vor- und zurückbewegte; zu beiden Seiten des Stieles, als einer trennenden Linie, traten Wirbel in Wirksamkeit, welche die Veränderungen des Pilzschwammes bewirkten. Dabei ist zu bemerken, dass der Wirbel auf der Leeseite an Intensität den auf der Luvseite übertrifft, da die trennende Linie zwischen beiden, der Stiel des Pilzes, sich stets auf die Seite des letzteren zu neigen strebt. Diese Erscheinung, dass auf der Leeseite, auf der der Strömung entgegengesetzten Seite, ein Wirbel oder auch eine Strömung entsteht, ist im Grunde nicht viel verschieden von der der sogenannten Compensationsströme.

Schon *Varenius* sagt: „Cum pars Oceani movetur, totus Oceanus movetur.“ *Krümmel*[16]) machte eine Reihe von Experimenten, welche die Behauptung dieses bekannten Geographen insofern bestätigen, als bei einer an der Wasserfläche horizontal verlaufenden Strömung Teilchen aus der Nachbarschaft sich dieser Strömung nähern und anschliessen, um den Verlust des abfliessenden Wassers zu ersetzen. Der bekannte Zerstäubungsapparat dürfte ebenfalls auf diesem Princip beruhen. Durch eine in horizontaler Lage befindliche, zugespitzte Röhre wird ein Luftstrom über die Spitze einer zweiten vertikal stehenden Röhre getrieben, so dass derselbe aus dieser Luftteilchen ansaugt und mit sich reisst. So entsteht in der vertikalen Röhre ein luftverdünnter Raum, das Wasser steigt aus dem Gefässe, in welches diese eintaucht, empor bis zur Spitze, wo die Zerstäubung erfolgt. Eine ähnliche ansaugende Wirkung ist bei den

---

[16]) Handbuch der Ozean., Bd. II, S. 356 ff.

Compensationsströmen vorhanden. *Ekman*[17]) der mit hydrotechnischen Untersuchungen an der Mündung des Götaflusses beschäftigt war, konnte sogar auf Grund des Salzgehaltes in den einzelnen Tiefenschichten dieses Flusses constatieren, dass bei starkem Compensationsbedürfnis nicht nur eine Seitenströmung sich geltend machte, sondern dass sogar eine, dem ausfliessenden Wasser entgegengesetzte Tiefenströmung vorhanden war. Die bei *Krümmel* Seite 360 angeführte Salztabelle liefert den diesbezüglichen Beweis. Besonders möchte ich noch auf *Krümmels* Experiment verweisen, welches uns eine ähnliche Erscheinung wie die der *Darwin*schen Wirbel auf der Leeseite eines Hindernisses vor Augen führt. Der auf der Leeseite eines scharfkantigen Hindernisses erzeugte secundäre Strom war so stark, dass Teilchen von Preussischblau, die von der primären Strömung luvwärts auf den Kamm transportiert wurden, dort nicht herabzurollen vermochten, sondern haften blieben.

Um auf *Darwins* Versuche zurückzukommen: auf beiden Seiten der Wellenfurchen sind also Wirbel thätig, welche, da sie mit abwechselnder Intensität in Wirkung treten, die Wellenfurchen und den sie überziehenden Tintenpilz bald nach der einen, bald nach der andern Seite hin verschieben. Nimmt die Oscillation der Wassermasse an Grösse etwas zu, so tritt bald eine Veränderung ein, indem ein Tintenströmchen zu beiden Seiten an den Abhängen der angrenzenden Rippeln herunterfliesst in die sie trennende Furche. Da, wo zwei solcher Tintenströmchen einander begegnen, steigt als trennende Linie ein Tintensäulchen empor, zu dessen beiden Seiten wieder 2 Wirbel thätig sind, die in Bezug auf Intensität wechseln und das emporstrebende Tintensäulchen abwechselnd in die Höhe treiben. Dieses steigt, je nach der Heftig-

[17]) Nova acta Reg. Soc. Upsal. Ser. III, 1876 cit. bei Krümmel.

keit der Oscillation, bis zu einer 5-, 10-, vielleicht auch 20fachen Höhe der Rippelmarke empor. Oben breitet sich dasselbe aus, so dass die ganze Erscheinung der Pinie eines in Eruption begriffenen Vulkans ähnelt. *Darwin* vergleicht sie mit einer Buche, einem Regenschirm und legt ihr den Namen Tintenbaum (inktree) bei. Die Äste, um das Bild zu vollenden, erreichen den Boden der Rinne und zwar den Gipfel des Pilzes, biegen nach innen dem Stamme zu und steigen von neuem in die Höhe. Zwölf bis 20 Oscillationen sind erforderlich, bis ein Tintenteilchen alle Phasen durchlaufen hat. Der Stamm des Bäumchens ist natürlich vielfach gewunden, und die Grösse dieser Windungen hängt ab von dem Betrage der Oscillation des Wassers. Die Figuren IV, V und VI der *Darwin*schen Abhandlung veranschaulichen diesen Vorgang. Jede Windung oder Schlangenlinie, die mit zunehmender Höhe ihrer benachbarten näher rückt, entspricht einer Oscillation der Wassermasse. Das Zusammenrücken der Schlangenlinien mit zunehmender Höhe liefert den Beweis, dass das aufwärtsstrebende Tintensäulchen, weil es sich immer weiter von den Wirbeln entfernt, die es abwechselnd in die Höhe getrieben, an Geschwindigkeit verloren hat, so dass es zwischen 2 aufeinander folgenden Oscillationen kleinere Wege zurücklegt.

Sobald der Tintenbaum auftritt, scheint der Pilz nach und nach zu verschwinden; es war wenigstens sehr schwer, beide zugleich herzustellen. „It cannot be asserted that the mushroom vortices exist, and I am somewhat inclined to believe them to be then evanescent.“ Jedenfalls aber verschwinden die beiden Pilzwirbel vollständig, wenigstens sind sie nicht mehr nachzuweisen, wenn die Oscillation an Grösse wieder etwas zunimmt, so dass dieselben von nun an durch die Baumwirbel vertreten sind. *Darwin* nennt erstere die primären, letztere die sekun-

dären Wirbel. Das Uebergangsstadium von ersteren zu letzteren ist gekennzeichnet durch das Vorhandensein des Pilzes und Baumes zu gleicher Zeit. In diesem Stadium scheinen 2 Wirbelpaare zu wirken; ob aber alle 4 Wirbel gleichzeitig thätig sind, konnte *Darwin* nicht konstatieren. Die Bewegung ist nämlich in diesem Stadium sehr unregelmässig, so dass *Darwin* hier wirklich zu keinem positiven Resultate, sondern nur zu Mutmassungen gelangen konnte. „In these early stages the phenomen is not highly regular, and therefore, besides the smallness of the scale and the rapidity of the motion, we have the difficulty of irregularity to contend with.“

Wenn nun die Bewegung stark genug geworden ist, so dass die Pilzwirbel nicht mehr konstatiert werden können, findet eine Wanderung der Baumwirbel statt. *Darwin* hat uns in Figur 10 seiner Abhandlung die Bewegung der Wirbel und des dazu gehörigen Tintenbaums deutlich vor Augen geführt. Betreffende Figur stellt in — sozusagen — 7 aufeinanderfolgenden Momentaufnahmen die Wanderung der Wirbel und eines Teiles des Tintenbaumes während einer Oscillation dar. Es ist klar, dass man alle 7 Phasen niemals bei einer Oscillation hinreichend zu konstatieren vermag, da die einzelne Phase nur ein Bruchteil einer Sekunde dauert. Viele Versuche waren somit erforderlich, bis das Bild, das uns den Zusammenhang der einzelnen Phasen veranschaulicht, konstruiert werden konnte.

Die Wirbel befinden sich, wie Figur X bei *Darwin*[18]) zeigt, stets am Kamme oder auf beiden Seiten der Wellenfurche, und ihre Drehung ist in der Nähe der Rippelmarke stets nach aufwärts gerichtet, so dass sie die Wellenfurche aufzubauen imstande sind. In der Mitte der Oscillation (Phase 4) bekunden die Wirbel je-

[18]) Proc of the Roy. Soc. of London, Vol. XXXVI.

doch eine nach abwärts gerichtete Thätigkeit, so dass sie einen Teil der Wellenfurche abtragen müssten. *Darwin* nimmt daher, falls überhaupt die bei grösserer Elongation nicht mehr zu konstatierenden Pilzwirbel noch vorhanden sein sollten, an, dass sie sich bei der in Frage kommenden Phase da befinden, wo Figur X die beiden Sternchen aufweist, um der momentan abtragenden Wirkung der Baumwirbel entgegenzutreten.

Sollten die kleineren Wirbel, welche *Darwin* an der bezeichneten Stelle vermutet, jedoch nicht vorhanden sein, so wäre die Existenz der Wellenfurche doch noch insofern gesichert, als keiner der beiden Wirbel während dieser Phase sein Maximum erreicht, ferner insofern als die Zeit, während deren eine Abtragung oder Verkleinerung der Rippel erfolgen dürfte, nur einen kleinen Bruchteil ausmacht im Verhältnis zur ganzen Halbperiode der Oscillation. Die beiden Wirbel erreichen nämlich ihr Maximum in dem Momente, wo die Wellenfurche am weitesten nach rechts, beziehungsweise nach links verschoben erscheint. Bei der Elongation der Wellenfurche nach rechts ist der rechte Baumwirbel am wirksamsten, während der linke infolge der Reibung längs der trennenden Linie sein Submaximum erreicht. Das Umgekehrte trifft natürlich für die entgegengesetzte Phase zu.

Dawin konnte die Entstehungsweise der Baumwirbel, welche nach seiner Ansicht auf die primären Wirbel zurückzuführen sind, in absolut befriedigender Weise nicht erklären. Beim Übergangsstadium, in welchem Baum und Pilz gleichzeitig vorhanden sind, ist die Bewegung, weil zwei Wirbelpaare inkraft treten, deren Wirkung unterbrochen scheint, äusserst kompliciert. Die Vorgänge sind, soweit sie festzustellen, sind, folgende:

Bei geringer Oscillation des Wassers über bereits gebildete Rippelmarken sind zunächst zwei Wirbel am

Kamme jeder Wellenfurche abwechselnd oder mit verschiedener Intensität in Wirksamkeit, so dass der Gipfel, allerdings kaum merklich, bald nach links, bald nach rechts abgelenkt erscheint. Nimmt die Bewegung der Wassermassen ein wenig zu, so erzeugt, wie Figur XI bei *Darwin* solches uns näher veranschaulicht, jeder primäre Wirbel durch Reibung den entsprechenden sekundären, der sich stets in entgegengesetzter Drehungsrichtung befindet. Ob beide Baumwirbel zugleich auftreten oder abwechselnd thätig sind, lässt sich nicht feststellen. Denkbar wäre es immerhin, dass, da die primären Wirbel an Intensität stets wechseln, der stärkere von beiden zuerst den entsprechenden sekundären Wirbel erzeugt, der dann bald wieder verschwinden würde, während der andere sekundäre Wirbel durch seinen nun stärkeren Pilzwirbel in Thätigkeit gesetzt wird. Vielleicht sind beide Baumwirbel auch im Übergangsstadium gleichzeitig in Thätigkeit, da einer den andern durch Reibung an der trennenden Linie zu erzeugen strebt. Der Umstand aber, dass *Darwin* öfters bald diese, bald jene Hälfte des Tintenbaums ausgebildet sah, würde davon zeugen, dass die beiden Wirbel einander ablösen.

Wie Figur XI bei *Darwin* beweist, müssen bei dem Übergangsstadium entgegengesetzte Bewegungsarten vorhanden sein, indem den in der Furche sich befindlichen Sandteilen eine andere Bewegungsrichtung innewohnt wie dem Kamme der stets sich ändernden Wellenfurche, was zweifellos von der entgegengesetzten Drehung des primären und seines entsprechenden sekundären Wirbels herrührt. *Darwin* vermochte eine derartige, in doppeltem Sinne sich vollziehende Bewegung festzustellen. Bei noch heftigerer Oscillation verschwinden die primären Wirbel, und die Baumwirbel scheinen allein die Arbeit zu besorgen, so dass eine Verschiedenheit in der Bewegungsrichtung der im Thale und auf dem Kamme sich

befindlichen Teilchen nicht mehr vorhanden war. „When the rocking is gentle the oscillation in the furrow appears to be in a different phase from that on the crest; with more violent rocking J did not observe the difference of the phase.“ Wenn die Bewegung schliesslich noch grösser, also ziemlich heftig werden sollte, so dass sie eine gewisse Grenze überschreitet, so werden die Sandmassen am Boden der Rinne aufgewühlt, die Rippelmarken hinweggefegt, und die Wirbel können zu ihrer Entfaltung die erwähnten Bedingungen (kleinere Sandanhäufungen) nicht mehr vorfinden.

Die Vorgänge, welche soeben geschildert wurden, spielen sich über bereits gebildeten Rippeln ab, wenn die Oscillation zunächst gering ist, dann etwas stärker, ziemlich bedeutend und schliesslich zu heftig wird.

Bei den bisher beschriebenen Versuchen wurden, um die Gesetze, nach welchen die Wirbel entstehen, wechseln und wirksam sind, festzustellen, bereits entstandene Rippeln zu Hilfe genommen. Wie angeführt, konnte *Darwin* konstatieren, dass die bezüglich der Wirbelbildung in Betracht kommenden Vorgänge im Anfangsstadium der Rippelbildung, wenn die Reibung an der Unterlage kleine Sandanhäufungen bereits verursacht hat, bei normaler Amplitude dieselben waren, wie die, welche sich abspielten, wenn über bereits gebildeten Rippeln eine sehr mässige Oscillation der Wassermassen stattfand. Sobald die Sandanhäufung grösser wurde, trat bei der Bildung der Rippeln ebenfalls ein Übergangsstadium ein, das sich dadurch kennzeichnen lässt, dass die bereits gebildeten Wellenfurchen bedeutend zunahmen, indem sie ihre Grösse verdoppelten, da je zwei Rippeln sich zu einer vereinigten. So ward eine Rippelmarke von doppelter Länge erzeugt, die schliesslich constant blieb, und die dabei zu berücksichtigende Wirbelbewegung war identisch mit der, welche bei bereits

gebildeten Wellenfurchen und ziemlich grosser Oscillation in Betracht kam. So constatierte *Darwin* bei jeder Entwicklungsphase der Wellenfurche und bei einer sich stets gleich bleibenden Intensität der Bewegung eine Analogie mit allen Vorgängen, die bei gebildeten Wellenfurchen und variabler Oscillation in Berücksichtigung zu ziehen waren. Demnach wäre der Sachverhalt bezüglich der Wirbelbildung bei der Entstehung der Rippelmarken derselben Art.

Sobald über einer ebenen Sandfläche eine Oscillation von ziemlich beträchtlicher Amplitude erzeugt wird, suchen die einzelnen Sandkörnchen aus den bereits erörterten Gründen (Adhäsion) dieser Bewegung zu folgen. An einzelnen Stellen bleiben dieselben schliesslich liegen, vermehren daselbst den Widerstand, so dass, falls die immerhin noch sehr kleinen Sandanhäufungen genügende Dimensionen erreicht haben, kleine Wirbel entstehen, die ihre Thätigkeit entfalten. Bald liegt ein und derselbe Wirbel auf der Lee-, bald auf der Luvseite. Beide Wirbel tragen nun gleichmässig zur weiteren Entwickelung der Rippelmarken bei, so dass sich die einzelnen Sandanhäufungen vergrössern, dabei aber so nahe aneinander rücken, dass sie sich zum Teil vereinigen. „As the sand tends to stick by friction in a great number of positions, the sand agglomerates into elongated patches.“

So entstehen zunächst kleine Rippelmarken von halber Länge. Dieselben nehmen infolge der Thätigkeit der Wirbel mehr und mehr zu, und mit zunehmender Grösse wächst schliesslich auch die Intensität der Wirbel. Bald ist dieselbe gross genug, so dass der stärkere, auf der Leeseite einer jeden Rippelmarke sich befindliche primäre Wirbel seinen entsprechenden sekundären Baumwirbel erzeugt, der wiederum infolge der Reibung längs der trennenden Linie den zweiten Baumwirbel ins Leben

ruft. Dieser hat aber zum Teil eine nach abwärts gelenkte Drehungsrichtung, welche das Bestehen der angrenzenden Wellenfurche wegen des kleinen Zwischenraumes insofern in Frage stellt, als er dieselbe stets zu verkleinern und abzutragen strebt. So geht die Wirkung beider Baumwirbel bei wechselnder Oscillationsrichtung abwechselnd darauf hinaus, dass jede zweite Rippelmarke vernichtet wird, und Wellenfurchen von doppelter Länge entstehen. „Perhaps the normal state of transition is, that only one of the secondary vortices is established at first, and that when the other secondary vortex is set up it tends to obliterate every alternate ripplemark, and thus to generate a ripple of double wave length."

Wie erwähnt, die Vorgänge bei diesem Übergangsstadium waren äusserst kompliciert, so dass *Darwin* hier nur mit Wahrscheinlichkeitsgründen operieren konnte. Diese Erklärung *Darwins* lässt in der That noch manches zu wünschen übrig. Welche Rippelmarken sind dazu auserlesen, weiterzubestehen, und welche sind der Zerstörung preisgegeben? Bei *Darwin* finden diese Fragen in der von ihm gegebenen Erklärung keinerlei Berücksichtigung.

Erinnern wir uns nun, dass wir es hier, im Experimente, mit stehenden Wellen zu thun haben. *Krümmel*[19]) schreibt: „Bei einer stehenden Welle bewegen sich die Teilchen im Innern der Flüssigkeit nicht mehr in geschlossenen Bahnen, sondern die Teilchen gehen durch dieselben Punkte derselben Bahnen wieder rückwärts, durch die sie vorwärts gegangen. Die Bahnen der schwingenden Teilchen sind nach *Merian* krumme Linien, welche gegen die Ebene der Ruhelage concav sind. Die horizontale Bewegung ist dabei ein Maximum genau

[19]) Handbuch der Ozeanogr. II. Teil, S. 141.

unter der Knotenlinie am Boden des Gefässes, während die vertikale Bewegung hier gleich Null ist.“ Auch nach *de Candolle* bildeten sich zunächst kleine Rippeln und dann erst solche von definitiver Länge. Bei allen Experimenten ergab es sich, dass die Wellenfurchen zunächst unter der Knotenlinie, weil hier die Geschwindigkeit am grössten ist, ihre definitive Länge erlangten.[20]) Auf Grund dieser Thatsache möchte ich den Schluss ziehen, dass die Bildung der Rippeln mit definitiver Länge von hier ausgeht. Der Wirbel auf der Leeseite der unter der Knotenlinie befindlichen Wellenfurche wird zunächst, weil er aus oben erwähnten Gründen zuerst die grössere Intensität erreicht, durch die indirekte Erzeugung des in Frage kommenden Baumwirbels den Bestand der angrenzenden Rippelmarke in Frage stellen. Diese verschwindet allmählich und ihr auf der Leeseite befindlicher Wirbel wird deshalb abgeschwächt, so dass er keine Baumwirbel erzeugen kann. Die demnächst folgende Rippelmarke weist wieder kräftigere primäre Wirbel auf, von denen der auf der Leeseite sich befindliche durch die aufeinander erfolgende Erzeugung seiner Baumwirbel den Fortbestand der nächsten Wellenfurche in Frage stellt u. s. w. So werden zunächst die unter der Knotenlinie befindlichen Rippeln ihre Grösse verdoppeln, so dass von hier aus nach beiden Seiten hin der Abstand der Rippeln endgiltig geregelt wird.

Sobald die Distance der Wellenfurchen konstant geworden, verschwinden die primären Wirbel, während die sekundären an Intensität zunehmen. Die Thalsohlen, die ursprünglich von Rippelmarken von halber Länge ausgefüllt waren, werden jetzt gründlich ausgefurcht,

[20]) Candolle schreibt: „Les rides prennent naissance dans la région médiane de l'auge, de part et d'autre du plan vertical qui la partage en deux parties égales. C'est aussi dans cette région que la composante horizontale du balancement est prédominante“.

bis die Wellenfurchen ihre definitive Gestalt erlangen. Lässt die Bewegung des Wassers allmählich nach, so treten dieselben Entwicklungsphasen auf, wie wir sie bei bereits gebildeten Rippeln und bei wechselnder Amplitude der Oscillation zu constatieren vermochten, natürlich in umgekehrter Reihenfolge. Das Wasser wird schliesslich ganz ruhig, und vollkommen regelmässige Rippelmarken bedecken den Boden der Rinne.

2) Arten der Rippelmarken.

Das Aussehen der so entstandenen Wellenfurchen ist vollkommen symmetrisch. Beide Abhänge sind gleich lang und zeigen denselben Böschungswinkel. Solche Rippelmarken finden sich wohl auf dem Flachboden des Meeres und der Binnenseen als marine und lacustrine Bildungen vor, wie dies beispielsweise von *Forel, Siau, Hunt, Krümmel* und anderen konstatiert wurde. Diese Rippeln dürften, da sie ihre Entstehung hauptsächlich der Welle zu verdanken haben, mit dem Namen „Wellenfurchen“ bezeichnet werden.

Ausserdem verdient noch eine andere Art von Rippeln erwähnt zu werden, Rippeln, die sich insofern von den ersteren unterscheiden, als sie zwei verschiedene Seiten mit verschiedenen Böschungswinkeln aufzuweisen haben. *Forel* erwähnt dieselben und nennt sie zum Unterschiede von den bereits betrachteten symmetrischen Rippelmarken, denen er den Namen „Rides“ (Furchen) beilegt, „Dunes“ (Wasserdünen). *Darwin* hat ihre Entstehungsweise ebenfalls näher untersucht und *de Candolle* hat sie durch Rotation in einem und demselben Sinne und bei wechselnder Geschwindigkeit (frottement intermittent) erzeugt.

Diese Stromfurchen oder Wasserdünen — ihre Entstehung hat mit der Welle nichts zu thun — verdanken ihre Bildung einem permanenten Strom. Sie sind dem-

nach als fluviatile Gebilde zu betrachten. *Darwin* erzeugte sie, indem er zunächst einige kaum sichtbare Minimalrippeln mit der Kante eines Brettes auf einer geglätteten Sandfläche hervorbrachte und über denselben einen konstanten Strom wirken liess. Es entstanden so unregelmässige Ketten von Stromfurchen, deren Leeseite stark geneigt war, während ihre Luvseite ziemlich flach verlief. Alsdann brachte er zwischen zwei Rippeln einen Tintentropfen und stellte auf diese Weise fest, dass auf der Leeseite ein Wirbel thätig war, während der Strom auf der Luvseite seine Wirksamkeit entfaltete.

Verfasser hatte Gelegenheit, solche Stromfurchen längere Zeit hindurch zu beobachten. Der Versuch *Darwins* findet in der That durch die Vorgänge in der Natur seine Bestätigung. Jene Wasserdünen, welche Verfasser vorfand, breiten sich im Bette eines Forellenbaches, des bereits erwähnten Kaltenbrunner Baches aus, der das Schönthal bei Neustadt a/H. durchfliesst und an der Mündung desselben sich in den Speyerbach ergiesst. Die Wasserdünen bedecken nicht überall das Rinnsal des Baches. Sie finden sich nur an geeigneten Stellen vor, und diese bleiben ihrerseits nicht immer dieselben.

Die anhaltende Dürre des vorigen Jahres machte sich natürlich auch bezüglich des Wasserreichtums unserer Flüsse[21]) geltend. So konnte ich bei niedrigem Wasserstande im September des vorigen Jahres an verschiedenen Stellen des Kaltenbrunner Baches, der höchstens eine Maximaltiefe von 50 cm erreichen dürfte und krystallhelles Wasser mit sich führt, Rippelmarken — dieselben waren unfern einer kleinen Brücke besonders schön und regelmässig[22]) ausgebildet — konstatieren, die

[21]) Ende August 1893 tauchte unterhalb der oberen Neckarbrücke zu Heidelberg eine Insel auf, die der jetzigen Generation bisher unbekannt geblieben war.

[22]) Nicht symmetrisch.

nach einigen Wochen verschwunden waren und sich bis jetzt nicht wieder gebildet haben. Es trat nämlich infolge zahlreicher Niederschläge in der folgenden Zeit eine positive Strandverschiebung ein, so dass der Bach reissender wurde, und die betreffenden Rippelmarken verschwanden. Dieser Umstand spricht dafür, dass für eine gewisse Korngrösse die Stromstärke eine gewisse Grenze nicht überschreiten darf.

Bei diesen Rippelmarken war, wie dies auch *Forel* in einem Bache bei Morges konstatieren konnte, die Leeseite bedeutend kürzer und steiler als die Luvseite. Das Verhältnis beider war schätzungsweise 1 : 3 bis 4. Auf der Leeseite entwickelte sich ein kräftiger Wirbel, der dem Strome auf der Luvseite entgegenarbeitete, so dass dieser die Rippelmarken nicht zu zerstören vermochte. Diese wanderten ganz langsam in dem Rinnsal des Flusses stromabwärts. Die Sandkörnchen wurden durch den Strom auf der Luvseite den Abhang der Wasserdüne hinaufgerollt. Am Kamme blieben sie grossenteils haften, da ihnen der Wirbel auf der Leeseite entgegentrat. Manchmal ergab es sich auch, dass Sandteilchen über den Kamm geführt, sodann aber in den Wirbel gerieten und von diesem auf der Leeseite dem Strome entgegengeführt wurden. Besonders war solches bei kleinen verfaulten Holzteilchen der Fall, die nahe am Boden, denselben fast berührend, stromabwärts getrieben wurden. Diese wurden des öfteren über den Kamm hinweggeführt, vom Wirbel erfasst und bis zur Leeseite der Wasserdünne zurückgetrieben. An dieser stiegen sie langsam empor, bis sie durch den oberen Teil des Wirbels wieder ein Stückchen stromabwärts getrieben wurden und dann durch den unteren Teil desselben wieder zurück, zur Leeseite der Rippel. Durch irgend welchen Zufall wurden solche Holzteilchen, sei es infolge seitlicher Verschiebung, sei es infolge ihrer höheren Erhe-

bung über den Kamm, schliesslich vom Strom erfasst und bis zur nächsten Rippel weiter transportiert, wo sich zuweilen dieselben Vorgänge nochmals abspielten; manchmal aber ereignete es sich auch, dass diese kleinen Holzteilchen direkt weiter befördert wurden. Der Grund liegt darin, dass die kleinen morschen Holzfasern da und dort den Boden berührten, sich alsdann einige Centimeter (der Boden ist ja nie ganz eben) entfernten, dann wieder anstiessen und sich zu entfernen strebten. Wenn nun ein solches Holzfäserchen zufällig dem Kamme einer Rippel sehr nahe kommt, so ist es sehr naheliegend, dass es von dem Wirbel erfasst wird und demselben zu folgen sucht. Wurde es aber einige Millimeter über dem Kamme der Wasserdüne hinweggeführt, so wanderte es weiter, da es vom Wirbel nicht erfasst werden konnte, bis es schliesslich einer der folgenden Rippelmarken näher kam, wo es einige Zeit lang in der beschriebenen Weise verharren musste.

Später wird von diesen beiden Arten von Rippeln nochmals die Rede sein, wenn Verfasser von ihrer Entstehung in der Natur zu sprechen hat. Zunächst soll noch untersucht werden, was die Versuche oben erwähnter Experimentalphysiker Übereinstimmendes in Bezug auf die Richtung und Länge der Rippelmarken bezüglich der sie erzeugenden Welle ergeben haben.

3) Richtung und Grösse der Rippelmarken.

Die Längsrichtung der Rippelmarken stand im allgemeinen senkrecht zur Richtung der wirkenden Kraft, und es war vollständig gleich, auf welche Art die Rippeln erzeugt wurden, ob sie gross oder klein waren. *De Candolle* liess eine mit Sand bedeckte Scheibe unter Wasser rotieren, und es entstanden dabei Rippeln, die senkrecht zur Bewegungsrichtung sich ablagerten und radial, wie die Speichen eines Rades, verliefen. Wurde

die Scheibe indessen hin- und hergeschoben, so entstanden Wellenfurchen, die alle untereinander parallel und zugleich senkrecht zur Bewegungsrichtung gelagert waren.

Interessant ist der Versuch, den *de Candolle* mit einem Gefässe veranstaltete, das er in Rotation versetzte und zugleich schaukeln liess. Es ergaben sich zwei Systeme von Rippelmarken. In der Mitte, wo die Rotation weniger zur Geltung kam, indessen die Bewegung des Wassers unterhalb der Knotenlinie ein Maximum erreichte, entstanden Wellenfurchen, die parallel mit einander waren und auf das Balancieren zurückzuführen wären. Weiter vom Centrum des Gefässes entfernt, kam jedoch die Rotation der Wasserteilchen mehr zur Wirkung, so dass daselbst radial verlaufende Rippelmarken zur Ablagerung gelangten. Diese Versuche *de Candolles* werden durch die von *Hunt*, *Darwin* und *Forel* bestätigt.

Es ist jedoch kein Zweifel, dass es auch Ausnahmen von dieser Regel gibt, dass die Terrainverhältnisse bei der Richtung und der Bildung der Wellenfurchen in gebührender Weise zu berücksichtigen sind. *Forel* wurde zunächst durch einen Vorgang in der Natur auf diese Thatsache aufmerksam gemacht. Am 23. Mai 1883 sah er, wie sich im Genfer See nahe am Ufer eine Wellfenfurche gebildet hatte, die ihre Entstehung und Richtung einem cylinderförmigen Blechgefässe verdankte. Dieses Blechgefäss ersetzte naturgemäss die im Anfangsstadium der Rippelbildung in Betracht zu ziehende Sandanhäufung, so dass es die Ausgangslinie für ein System paralleler Rippeln wurde, wiewohl die Richtung des Gefässes und der ihm parallel verlaufenden Wellenfurchen nicht senkrecht zur Bewegung der Wellen zu sein braucht. *Forel* kam daher auf den Gedanken, mit Hilfe eines Metallstreifens diesen, in der

Natur beobachteten Vorgang im Experimente nachzuahmen. Das Metall wurde quer in die Rinne (also nicht senkrecht zu ihrer Längsachse) gelegt. Es entstand zuerst eine Wellenfurche, deren Kern von dem Metallstreifen gebildet wurde; alsdann traten neue Rippeln auf, die sich parallel zu der, von dem Metallstreifen gebildeten Wellenfurche ablagerten, und die somit nicht senkrecht zur Bewegungsrichtung der Wassermassen standen. „Tout le système des rides s'est ainsi établi successivement dans le sable, en partant de l'obstacle artificiellement placé."

Dass dieser Vorgang nicht dem reinen Zufall zuzuschreiben sein mag, geht aus dem Umstand hervor, dass *Forel* das Experiment öfters wiederholte[23]) mit der Modification, dass er das fragliche Hindernis da anbrachte, wo sich vorher eine Furche befand. „Tout le système des rides avait donc été déplacé de l'espace d'une demi-largeur de ride." Ebenso kann eine Vertiefung den Ausgangspunkt für ein ganzes System von Rippeln bilden. „Un creux tracé dans le sable amène au même résultat."[24])

Die Erklärung dieses Vorganges führt *Forel* auf den Umstand zurück, dass der Sand führende Strom einen Teil desselben an dem Hindernisse abgibt, während der Rest des Sandes über den Kamm hinweggeführt wird und auf der andern Seite des Metallstreifens so lange liegen bleibt, bis er bei der Rückkehr des Stromes von diesem erfasst, bis zum Hindernisse weitergeführt und hier zum grossen Teil von neuem zurückgelassen wird. So entsteht zunächst eine Erhöhung, deren Kern von dem Metallstreifen gebildet wird. Da nun der

[23]) Die Intensität der Bewegung der Wassermasse darf nicht zu gross werden, da sich sonst das Hindernis senkrecht zur bewegenden Kraft legt.

[24]) Was auch Darwin bestätigt.

Strom, so oft er das Hindernis passiert, einen Teil des Sandes verliert, macht sich schliesslich ein bedeutender Verlust an Sand geltend, so dass zu beiden Seiten der Erhöhung eine Vertiefung, eine Furche folgt, die ihrerseits wieder Veranlassung zur Entstehung einer weiteren Wellenfurche gibt und sofort. Es ist begreiflich, dass der Sand, welcher während einer halben Oscillation die Strecke l zurücklegen sollte, einerseits haften bleibt, andererseits in den, hinter dem Hindernisse wirkenden Wirbel fällt, so dass die Sandmassen nicht alle bis zur Entfernung l transportiert werden können. So muss natürlich am Ende der Strecke l, wo verhältnismässig nur unbedeutende Ablagerungen erfolgen können, eine Vertiefung entstehen, die, was *Forels* Experimente erwiesen, wieder eine Wellenfurche hervorruft u. s. w.

Wie diese Furche ihrerseits aber eine Rippelmarke erzeugt, auf diese Frage geht *Forel* nicht näher ein. *Darwins* Wirbelgesetz versetzt uns in die Lage, den ganzen Vorgang zu erklären. Sobald das betreffende Hindernis genügende Dimensionen angenommen hat, treten die *Darwin*schen Baumwirbel abwechselnd in Wirksamkeit. Diese Baumwirbel, welche, wie bereits erörtert wurde, die ursprünglichen Rippelmarken von halber Länge abwechselnd zerstören und die Furche gründlich ausfegen, werden dafür sorgen, dass die Sandmassen erst in einer gewissen, den entsprechenden Umständen angepassten Entfernung wieder zur Ablagerung gelangen können. Am Ende dieser Entfernung entsteht zunächst eine kleinere Sandanhäufung, die sich nach und nach zu einer vollständigen Wellenfurche auswächst und somit zur Entstehung weiterer Rippelmarken Veranlassung geben kann. Die Baumwirbel wären es demnach, welche bei der Bildung des Thales und zum Teil auch bei der Entstehung der folgenden Wellenfurche in Betracht zu ziehen sind. Nach *Forel* kommt die Strecke l, welche

die Sandkörnchen bei einer Oscillation zurücklegen, bei der Bildung der Rippeln in Betracht. Somit wären wir bei der Thatsache angelangt, dass die Länge der Rippeln, da obige Strecke l mit der Grösse und Heftigkeit der Oscillation variiert, ebenfalls von diesen Faktoren abhängig ist.

Die Thatsache, dass die Länge der Rippelmarken in gewissen Grenzen von der Heftigkeit der Oscillation abhängt, bestätigt *de Candolle,* der darauf hinweist, dass bei geringer Amplitude der Oscillation kleinere Wellenfurchen entstehen, und dass ihre Entfernung von einander um so grösser wird, je mehr die Amplitude der Oscillation beträgt.

Allerdings bedarf der zweite Teil des *Candolle*schen Fundamentalsatzes einer Erweiterung, wenn *de Candolle* sagt: „L'écartement des rides est en raison directe de l'amplitude du frottement." Sobald nämlich das die Welle erzeugende Agens nach und nach verschwindet, nimmt auch jene an Intensität ab, die Reibung wird geringer, und die gebildeten Wellenfurchen müssten demnach ihre Entfernung und Grösse verändern. Die Rippelmarken müssten mit abnehmender Heftigkeit der Bewegung sich verkleinern und schliesslich ganz verschwinden. Diese Folgerung findet weder in der Natur noch im Experimente ihre Bestätigung, und *Forel* weist sogar nach, dass auf bereits gebildete Rippeln die Abnahme der Intensität der Oscillation von keiner Bedeutung ist. „L'amplitude du balancement n'a pas d'influence sur la largeur des rides, une fois formées." Ähnlich spricht sich auch *Darwin* aus: „It is to note that when once a fairly regular ripplemark is established, a wide variability of amplitude in the oscillation is consistent with its maintenance or increase. No explanation of ripple-making can be deemed satisfactory which does not satisfy this condition." Dem zweiten

Teile des *de Candolle*schen Fundamentalsatzes wäre demnach, wie *Forel* bemerkt, der Zusatz „au moment de leur établissement“ beizufügen.

Ob aber die Länge der bereits gebildeten Rippelmarken dieselbe bleibt, wenn die Grösse und Geschwindigkeit der Oscillation zunimmt, ist sehr fraglich. Es ist wohl anzunehmen, dass bei verhältnismässig kleiner Zunahme bezüglich der Heftigkeit der Oscillation die Wellenfurchen sich nicht wesentlich verändern, falls die Oscillation keine zu grosse Dauer hat. Anders verhält es sich jedoch, wenn die Intensisät der Oscillation bedeutend wächst, oder wenn die Wirkung der, wenn auch nur ein wenig heftigeren Oscillation lange andauert.

Im ersten Falle kann die Intensität der Bewegung so gross und die Geschwindigkeit des Wassers so heftig werden, dass, wie solches vielfache Experimente beweisen, die Sandteilchen aufgerüttelt und somit die Wellenfurchen zerstört werden. Dies ist stets der Fall, wenn die Intensität der Oscillation im Verhältnis zur Grösse der Sandkörner sehr beträchtlich ist, so dass die verhältnismässig leichten Sandkörnchen die Reibung am Boden überwinden und nicht zur Ablagerung gelangen. Erst bei abnehmender Geschwindigkeit der Schwingung werden sich neue Rippeln bilden.

Anders wird sich der Sachverhalt im zweiten Falle gestalten, wenn die Heftigkeit der Oscillation zwar zugenommen hat, aber immerhin nicht so viel, dass sie imstande ist, den Sand am Boden der Rinne aufzuwühlen. Jede Rippellänge, die im Sande von bestimmter Korngrösse gebildet wird, entspricht einer bestimmten Intensität der Oscillation des Wassers. Die vergrösserte Intensität der Oscillation strebt danach, Rippelmarken von der ihr zukommenden Grösse zu erzeugen. Es wird nämlich, da auch die Intensität der Wirbel mit der Geschwindigkeit der Bewegung zunimmt, ein Wirbel mit

dem benachbarten in Konflikt geraten, da beiden für die verhältnismässig starke Oscillation ein zu kleiner Wirkungskreis zugewiesen ist. Dabei werden zu beiden Seiten der Rippeln Strömungen von noch komplicierterer Art, wie die im Übergangsstadium von der halben zur doppelten Rippellänge, in der oscillierenden Bewegung der unteren Wasserschichten eintreten, so dass die Rippeln allmählich ganz oder teilweise verschwinden. Der Sand wird sich an einigen noch vorhandenen Unebenheiten, welche von den früheren, noch nicht ganz vertilgten Rippeln geliefert werden, anlagern. Diese Sandablagerungen werden sich vergrössern und zusammenwachsen, neue Wirbel treten auf, und es wird sich somit ein neues System von Rippeln bilden, deren Länge der Heftigkeit der Oscillation genügt. *Darwins* Experimente (Exper. 7—13 S. 20. Proc. of R. S. Bd. XXXVI), die bei gleichem Wasserstande aber verschiedener Intensität der Oscillation vorgenommen wurden, bewiesen ebenfalls, dass die Länge der Rippeln mit der Geschwindigkeit des Wassers zunimmt. Es entstanden um so mehr Rippelmarken, je kleiner die Geschwindigkeit war, eine grössere Geschwindigkeit erzeugte natürlich eine kleinere Anzahl von desto grösseren Wellenfurchen auf derselben Fläche.

Was jedoch die Zunahme der Rippeln in Bezug auf ihre Grösse betrifft, ob dieselbe nämlich direkt proportional ist der Zunahme der Amplitude oder dem Quadrate derselben, in dieser Beziehung scheinen die Ansichten *Forels* und *Darwins* auseinander zu gehen. — *Forel* macht nämlich die Grösse der Rippelmarken abhängig von der Länge des Weges, welchen ein Sandkörnchen infolge des in Bewegung befindlichen Wassers während der Halbperiode einer Oscillation zurücklegt: „La largeur des rides, soit la distance d'une crête à l'autre, est le trajet que ferait, dans un monvement de balancement, un grain de sable librement transporté par

l'eau.“ *Forel* meint[25]) den Weg, welchen ein Sandkörnchen von mittlerer Grösse am Boden des Gefässes während der Halbperiode einer Schwingung zurücklegt, und so kommt er auf Grund dieser Behauptung zu dem Schlusse, dass kleinere Sandkörnchen unter gleichen Verhältnissen grössere Rippeln bilden müssten, dass die Länge der Wellenfurche sich also umgekehrt verhalte wie die Grösse und das spezifische Gewicht der sie bildenden Sandkörner. Dieses, auf rein theoretischen Deduktionen beruhende Resultat stimmt mit den Erfahrungen nicht überein. *Forel* befindet sich ausserdem mit *Darwin* insofern im Widerspruch, als nach seinen Ausführungen[26]) die Länge des Weges, welchen ein Körnchen von mittlerer Grösse während einer halben Periode zurücklegt, direkt proportional ist der Amplitude und der Geschwindigkeit der balancierenden Wassermasse. Da nun die Geschwindigkeit selbst wieder das Verhältnis oder den Quotienten zwischen der Amplitude der Oscillation und ihrer Dauer darstellt, so wäre die Länge des Weges, welchen ein Körnchen während der halben Schwingungsperiode des Wassers zurücklegt, direkt proportional dem Quadrate der Amplitude, dividiert durch die Halbperiode der Oscillation. Nach *Darwins* Experimenten, die er zum Teil (Exp. 7—14) einer analytischen Rechnung unterwarf, war die Grösse der Rippelmarken stets direkt proportional der Geschwindigkeit der Wassermasse, und diese stand, wie bei *Forel,* in direktem Verhältnis zu dem Quotienten, der aus der Grösse der Amplitude und deren Periode resultiert, oder es war die Grösse der Rippelmarke, indem *Darwin* alle Zahlen auf die Zeiteinheit reducierte, proportional der Anzahl der Oscillationen in einer Minute, respektive in einer Sekunde, multipliziert mit der Amplitude der Schwingung.

[25]) Proc. etc. Bd. 36, S. 39. Anm.

[26]) Arch. etc. Bd. X, S. 59.

Darwin fand so für eine gewisse Sandgrösse unter gewissen Voraussetzungen, dass die Länge der Rippeln zur Geschwindigkeit der Oscillation sich im Mittel verhielt wie 0,147 : 1, falls die Sekundengeschwindigkeit in Zoll ausgedrückt war,

Demnach wäre nach *Darwin* die Länge der Rippeln einfach proportional der Geschwindigkeit, und diese ist wiederum gleich der Amplitude, multipliciert mit der Anzahl der Oscillationen in der Zeiteinheit.

Es ist offenbar ein Widerspruch zwischen *Forels* Behauptungen und den Experimenten *Darwins* vorhanden. Wenn es nun richtig ist, dass, was *Forel* behauptet, die Länge der Wellenfurche so gross ist, dass sie der Strecke gleichkommt, die ein Sandkörnchen von mittlerer Grösse während der Halbperiode einer Oscillation durchläuft, so muss *Forels* Ansicht zu Recht bestehen. Der Weg, den ein solches Sandkörnchen zurücklegt, wird mit der Amplitude der Oscillation einerseits zunehmen, andererseits aber auch mit der Geschwindigkeit derselben, da die Körnchen mit zunehmender Insensität der Bewegung während der Dauer einer halben Oscillation grössere Wege zurücklegen, und es kann kein Zweifel sein, dass diese Intensität oder Geschwindigkeit der Bewegung den Quotienten darstellt zwischen der Grösse der Amplitude und ihrer Periode. Andererseits führen die Experimente *Darwins* zu anderen Resultaten.

Der Widerspruch mag daher rühren, dass *Forel* mit mehreren Rinnen von verschiedener Länge experimentierte, so dass es ihm möglich war, stehende Wellen von derselben Amplitude, aber mit verschiedener Geschwindigkeit der Wassermassen[27]) zu erzeugen. Dies

---

[27]) Nach Forel lautet die Formel für stehende Wellen: $t = c \frac{l}{\sqrt{p}}$, wobei t die Periode der Schwingung, l die Länge des Bassins, p dessen Tiefe und c ein weiterer Faktor bedeutet.

war *Darwin,* der bei seinen Versuchen, mittelst deren er das Wirbelgesetz festzustellen vermochte, eine und dieselbe Rinne mit übrigens gleichem Wasserstande benutzte, nicht möglich. Daher war auch die Summe der Grösse einer Wellenfurche, der Oscillation ihres Kammes und der Länge einer Schlangenlinie des Tintenbaums ungefähr ebenso gross, wie die Amplitude der Oscillation der Wassermassen,[28]) und diese Amplitude muss naturgemäss in demselben Gefässe bei gleichem Wasserstande wieder direkt proportional der Geschwindigkeit des Wassers sein, so dass die Länge der Rippelmarken mit der Amplitude in einfachem Verhältnisse zunehmen muss. Für ein und dasselbe Gefäss sind Amplitude und Geschwindigkeit der Oscillation zwei von einander abhängige Faktoren, die allerdings nicht ganz identisch sind.

Bei *Darwins* Rotationsrippeln (Exp. 7—14), bei denen keine stehenden Wellen zur Anwendung gelangten, war es allerdings möglich, bei gleichen Amplituden verschiedene Geschwindigkeiten zu erzeugen. *Darwin* verweist nun auf diese in § 1 gefundenen Resultate und behauptet, es wäre bei gleichem Wasserstande die Länge der Rippeln proportional der Geschwindigkeit gewesen ohne Rücksicht auf die Grösse der Amplitude.[29]) Vergleichen wir aber diese Resultate, die sich auf Grund der Experimente und einer analytischen Berechnung ergaben, so finden wir, dass das Verhältniss von $\lambda : v$ immerhin zwischen ziemlich weiten Grenzen (0,0031 : 1 und 0,002 : 1) schwankt, und es dürfte daher etwas gewagt erscheinen, wenn man die Länge (λ) der Rippelmarken nur von der Maximalgeschwindigkeit (v) des Wassers im

[28]) Proc. etc. Bd. XXXVI, S. 31.

[29]) Darwins Angaben sind wenig zu einer rechnerischen Verwertung geeignet, da die Geschwindigkeit der Wassermassen über den Rippeln verschieden war. Am Rande des Rotationsgefässes war sie grösser als in der Nähe des Centrums.

Verhältnis zum Boden der Rinne abhängig machen wollte. Es wäre wünschenswert, dass weitere Messungen vorgenommen werden, die um so bessere Resultate in Aussicht stellen dürften, wenn sie auf Experimenten mittelst stehender Wellen in verschiedenen Rinnen beruhen würden. Rotationsrippeln sind meines Erachtens nicht besonders zweckdienlich, da eine und dieselbe Wellenfurche entsprechend der Geschwindigkeit des Wassers in ihren verschiedenen Teilen eine verschiedene Länge aufweist, und es dürfte doch wohl dem wahren Sachverhalt in der Natur nicht entsprechen, wenn über den verschiedenen Teilen derselben Rippelmarke die Geschwindigkeit eine verschiedene ist.

Forels Experimente ergeben also, dass neben der Geschwindigkeit des oscillierenden Wassers die Amplitude der Oscillation bei der Länge der Rippelmarken noch zu berücksichtigen ist. Welcher von diesen beiden Faktoren dabei mehr in Betracht kommt, lässt sich auf Grund des vorliegenden Materials nicht mit Bestimmtheit feststellen. Folgende Betrachtung dürfte dem wahren Sachverhalt vielleicht etwas näher kommen.

Bei der Entstehung der Rippelmarken spielt *Darwins* Wirbelgesetz eine Hauptrolle, und es ist daher zu berücksichtigen, dass die Länge der Rippeln auch von der Intensität der Wirbel abhängt. *Darwin* hat nun gefunden, dass da, wo der Sand auf einer, unter Wasser oscillierenden Glasplatte eine dünne Schicht bildet, kleinere Rippeln entstehen als da, wo eine mächtigere Sandschicht sich abgelagert hat. Dort haben die kleineren Sandmassen keine Gelegenheit sich zu vergrössern, und es können daher die Wirbel an Intensität nicht zunehmen und jede zweite Rippelmarke zerstören.[30]) Anders ver-

[30]) „The maximum velocity of the water relatively to the bottom must depend upon the intensity of the vortices, and this depends upon the height of the ripple-mark."

hält es sich bei einer dickeren Sandschicht. Hier entstehen stets Wellenfurchen von doppelter Länge.[31]) Auf Grund dieser Thatsache lässt sich der Schluss ziehen, dass die Amplitude der Oscillation und deren Geschwindigkeit im Anfangsstadium der Rippelbildung beide zugleich massgebend sind für die Länge der Wellenfurchen, wenn die einzelnen Teilchen hin- und herwandern und schliesslich sich anzuhäufen trachten. Es entstehen so Rippeln, die ungefähr so lang sind, wie der Weg, den ein Sandkörnchen von mittlerer Grösse während der Halbperiode einer Oscillation zurücklegt. Sobald aber die Sandanhäufungen wachsen, verschwindet jede zweite Rippel infolge der Thätigkeit der Baumwirbel. Die Baumwirbel verrichten jetzt alle Arbeit, und ihre Intensität ist einzig und allein abhängig von der Geschwindigkeit der Wassermassen. Die Sandteilchen bewegen sich jetzt nicht mehr wie im Anfangsstadium der Rippelbildung so weit, dass der von ihnen zurückgelegte Weg der Länge der Rippelmarke gleichkommt, sondern das Schwanken des Kammes ist, wie *Darwins* Abbildungen beweisen, bedeutend geringer.

De Candolles Behauptung,[32]) dass die einzelnen Teilchen von Gipfel zu Gipfel wandern, mag daher für das Anfangsstadium der Rippeln gelten. Er widerspricht[33]) sich übrigens, wenn er im Satze zuvor behauptet, dass die Sandteilchen am Gipfel der Wellenfurche bald nach der einen, bald nach der andern Seite

---

[31]) Candolle scheint diese Thatsache nicht beobachtet zu haben. Nach Candolle war die Anzahl der Rippeln stets gleich, ob die Materie vervielfältigt wurde oder nicht. (Arch. etc. Bd. IX, S. 262. Anm.) Dies mag wohl daher rühren, dass immer eine genügende Sandmenge vorhanden war. Übrigens hat Candolle selbst Rippeln von halber Länge konstatiert.

[32]) Arch. etc. Bd IX, S. 257.

[33]) Proc. etc. Bd. XXXVI, S. 38.

pendeln. Sobald nämlich die Baumwirbel in Thätigkeit sind, kann unmöglich der Weg, den ein Teilchen zurücklegt, gleich der Länge der Rippelmarken sein. Die einzelnen am Gipfel befindlichen Sandkörnchen pendeln hin und her, und die in der Furche befindlichen suchen die Bewegung bei stärkerer Oscillation in demselben, bei schwächerer Bewegung im entgegengesetzten Sinne mitzumachen. Jedoch bleibt nach *Darwin* (S. 28/29) die Bewegung der letzteren stets geringer als die der am Gipfel befindlichen Teilchen.

Trotzdem könnte man den Einwurf machen, dass, obwohl die Intensität der Wirbel allein von der Geschwindigkeit der Oscillation abhängt, die Grösse der Amplitude insofern in Betracht zu ziehen sei, als sie sich bei dem Transport der Wirbel beteiligen könnte. Nach *Krümmel* schieben sich die einzelnen Wasserteilchen bei der stehenden Welle am Boden hin und her, so dass Strömchen von abwechselnder Richtung entstehen, und die Länge dieser Strömchen wird notwendigerweise von der Grösse der Amplitude abhängig sein. Wie aber beim fliessenden Wasser der Wirbel auf der Leeseite trotz des langen am Boden des Rinnsals wirkenden Stromes, den man sich gewiss recht lang zu denken hat, nicht von der ihm zugehörigen Wellenfurche bis zur nächstfolgenden durch eben diesen Strom entfernt wird, ebenso hätten wir den Vorgang im obigen Falle zu erklären. Immerhin wäre es wünschenswert, wenn weitere Untersuchungen und Experimente geeignet wären, mehr Licht über diesen etwas dunklen Vorgang zu verbreiten.

Bei der Länge der Rippeln wäre nach *Forel* die Korngrösse des Sandes in Betracht zu ziehen. Es ist bereits auf den Widerspruch hingewiesen worden, der sich zwischen *Forels* theoretischen Untersuchungen und der Erfahrung geltend macht. Die Grösse der Rippeln wäre nach *Forel* indirekt proportional dem Volumen

und spezifische Gewichte der Sandkörner, ein Theorem, das sich mit seinen Experimenten (Arch. S. 51 Bd. X) nicht in Einklang bringen lässt. *De Candolle, Darwin* und *Forel* selbst haben auf diese Thatsache aufmerksam gemacht. Der Grund liegt darin, dass kleinere Sandteilchen die grössere Wellenfurchen bilden müssten, bei heftiger Oscillation nicht zur Ablagerung gelangen, während dies bei Sandkörnern von grösserem Volumen eher möglich ist. Erstere können sich erst dann zu Wellenfurchen vereinigen, wenn die Intensität der Bewegung abgenommen hat, so dass notwendigerweise den bei kleinerer Oscillation gebildeten Wellenfurchen auch eine kleinere Länge entspricht.

Daraus geht zugleich hervor, dass die Grösse der Wellenfurchen nur in gewissen Grenzen proportional sein kann der Geschwindigkeit der Bewegung. Ist die Intensität der Bewegung zu gross oder zu gering, so entstehen keine Wellenfurchen, eine Thatsache, die sich am besten mit Hilfe einer Rotationsrinne beweisen lässt. Unter gewissen Umständen bilden sich nur in der Mitte einer solchen Rinne Rippelmarken, am Rande und in der Nähe des Zentrums werden dieselben ausbleiben, da im ersten Falle die Bewegung zu intensiv, im zweiten Falle zu schwach sein kann. Daher kommt es auch, dass sich zunächst die grösseren Sandkörner ablagern und dann die kleineren. Letztere bilden dann den Gipfel der Wellenfurche.

Schliesslich wäre die Frage noch zu erörtern, ob die Tiefe des Wassers die Grösse der Rippelmarken zu beeinflussen mag. Die Beobachtung zeigt, dass die Länge der Rippeln sich umgekehrt verhält wie die Tiefe des Wassers. Für diese Thatsache sprechen die Versuche *Forels* (S. 50), und *de Candolle* sucht den wahren Sachverhalt (Arch. IX S. 256/57) zu erklären.

Bei den diesbezüglichen Experimenten kamen uni-

nodale Schwingungen in Betracht. Die Fläche, die durch die Knotenlinie senkrecht zum Boden der Rinne gelegt wird und das Becken in 2 gleiche Teile teilt, wird ihre Grösse bei der Oscillation der Wassermasse nicht verändern. Die Wasserteilchen passieren diese Ebene, indem ein Teil der Flüssigkeitsmasse von einer nach der andern Seite gelangt. Ist nun bei gleicher Amplitude der Bewegung in zwei aufeinander folgenden Experimenten der Wasserstand verschieden, so wird dennoch dieselbe Wassermenge den Querschnitt unter der Knotenlinie passieren. Bei niedrigem Wasserstande ist dieser Querschnitt bedeutend geringer als bei grösserer Tiefe des Wassers; in beiden Fällen fliesst aber dieselbe Flüssigkeit von einer nach der anderen Seite. Es ist daher kein Zweifel, dass die Bewegung im ersten Falle in der Nähe der Mittelebene eine intensivere sein muss. *De Candolles* Erklärung ist jedoch nicht ganz korrekt. Er setzt stillschweigend voraus, dass bei verschiedener Tiefe des Wassers die Periode der Oscillation dieselbe sei. Nach *Forel*[34]) steht diese jedoch im umgekehrten Verhältnis zur Quadratwurzel aus der Tiefe des Wassers. Mit zunehmender Tiefe wird demnach die Periode der Oscillation kürzer, so dass die Intensität der Bewegung in diesem Falle wachsen müsste, falls die Amplitude dieselbe bleibt. Einerseits würde also bei gleicher Amplitude wegen der zeitlichen Verkürzung der Schwingungsdauer die Intensität der Bewegung mit der Wassertiefe zunehmen, andererseits aber wächst der Querschnitt, durch den sich die einzelnen Wasserteilchen von einer nach der andern Seite verschieben, so dass die Geschwindigkeit in der Nähe des Querschnitts eine geringere sein muss. Trotzdem bleibt *Candolles* Behauptung, obwohl sie etwas inkorrekt ist, richtig. Nimmt die Tiefe des

[34]) Archives LVII p 278. Genf 1876 und Arch. d. sc. Bibl. un. Bd. X, S. 50.

Wassers beispielsweise um das Vierfache zu, so wird auch der Querschnitt in demselben Masse sich erweitern und die Geschwindigkeit der Wasserteilchen eine 4mal kleinere werden. Die Schwingungsdauer wird dagegen nicht um das Vierfache, sondern nur um die Hälfte reduciert, sie wird also eine doppelt so grosse Intensität erzeugen, so dass der Querschnitt gegenüber der Periode mehr in Betracht zu ziehen wäre.

Hunt, der sich in seiner Abhandlung „On the formation of Ripplemark" eingehend mit der Tiefenwirkung der Wellen beschäftigte, constatierte, dass sich die Wellenbewegung in seiner Rinne bis zur 62fachen Tiefe der Wellenhöhe fortpflanzte; nach den Gebrüdern *Weber* kann sich die Wirkung sogar bis zu einer Tiefe, welche der 350fachen Wellenhöhe gleichkommt, bemerkbar machen. Es könnten demnach in derartigen Tiefen, falls die Wirkung der Welle noch stark genug wäre, kleinere Wellenfurchen in feinerem Sande oder im Schlamme erzeugt werden.

Nach *Darwin* müsste die Geschwindigkeit des Wassers am Boden der Rinne mehr wie 6 Zoll pro Sekunde betragen, falls noch Rippelmarken entstehen sollen. *Hunt* ist indessen der Ansicht, dass bei alternierenden Strömen bereits eine Geschwindigkeit von 4 Zoll genügt, um Rippelmarken von der Länge eines Zolles zu bilden. Selbst eine kleinere[35]) Stromgeschwindigkeit würde noch Wellenfurchen von geringerer Ausdehnung erzeugen. *Karl W. Lyell* führt aus, dass ein Strom von 6 Zoll Geschwindigkeit pro Sekunde genügt, um feinen Sand zu heben.[36])

In neuester Zeit hat sich *Thoulet*[37]) mit dieser

---

[35]) Hunt, S. 15 und 16.

[36]) Princ. of Geol. vol. 1 p. 348, 10. ed.

[37]) „Expériences sur la Sedimentation". Annales des Mines 1891 und Peterm. Mitt. Bd. 37. Litteraturb. No. 453.

Frage beschäftigt, indem er eine Reihe von Experimenten unter den verschiedensten Bedingungen zur Ausführung brachte. Es ergab sich dabei, dass die Steigerung des Druckes bis auf 15 Atmosphären ohne Einfluss war auf die Geschwindigkeit des Niederschlages.[38]) Die Versuche bestätigten ferner das Brewersche Gesetz, nach dem sich der Niederschlag im salzigen Wasser bedeutend rascher vollzieht wie im destillierten. Ein Strom von nur 2,9 mm pro Sekunde war nach *Thoulet* imstande, die feinsten Globigerinenschalenstückchen aufzuheben, grössere Stückchen wurden von einem 10fach grösseren, also von einem Strome von 2,9 cm Geschwindigkeit aufgehoben. Daraus geht hervor, dass die Bewegung eine äusserst schwache sein darf, wenn noch Wellenfurchen, allerdings von geringer Ausdehnung und in äusserst feinem Sande entstehen sollen.

4) Resultat.

Aus all diesen Betrachtungen geht hervor, dass stehende Wellen imstande sind, Wellenfurchen zu erzeugen. Wirbel sind es, welche an dem Aufbau der Rippelmarken beteiligt sind. Diese Wirbel wechseln in Bezug auf Intensität, da die Wasserteilchen bald nach der einen, bald nach der andern Seite sich verschieben. Die Rippeln weisen, da die Bewegung im abwechselnden Sinne, aber stets mit gleicher Heftigkeit erfolgt, gleiche Böschungswinkel und Seiten auf.

Konstante Ströme können ebenfalls Rippelmarken bilden. Diese Rippelmarken (Wasserdünen, Stromfurchen, nicht zu verwechseln mit den Stromrinnen) zeigen indessen auf beiden Seiten verschiedene Böschungswinkel, und zwar fällt die steilere und zugleich kürzere Seite

[38]) Einer Wassersäule von ca. 10 m entspricht bekanntlich eine Zunahme des Druckes von 1 Atmosphäre.

stets mit der Leeseite zusammen. Diese Rippeln, deren Entstehung auf eine konstante Strömung, nicht aber auf stehende Wellen zurückzuführen wären, haben vieles gemeinsam mit den terrestrischen Sandablagerungen, speziell mit den Windrippeln, die *Walther* u. a. zu bemerken Gelegenheit hatten.

Die Richtung der Rippelmarken verläuft im allgemeinen senkrecht zu der der stehenden Welle oder des sie erzeugenden Stromes. Die Terrainverhältnisse dürften indessen die Richtung der Wellenfurchen wesentlich beeinflussen. Die Länge der Rippeln nimmt nach obigen Ausführungen mit der Grösse und Geschwindigkeit der Welle, ferner mit der Korngrösse und dem spezifischen Gewichte des Sandes zu. Dagegen wäre sie indirekt proportional der Wassertiefe. Das Gesetz von der Länge der Rippelmarken bedarf indessen noch der Vervollständigung. Es gilt übrigens nur innerhalb bestimmter Grenzen, indem bei allzu heftiger Oscillation ebensowenig Wellenfurchen erzeugt werden können, als wenn die Bewegung an Stärke ein gewisses Minimum nicht mehr erreicht. Das Maximum und Minimum der zulässigen Bewegung sind beide von der Korngrösse und dem specifischen Gewichte des Sandes abhängig. Die wenig mit einander übereinstimmenden Versuche, welche in dieser Beziehung angestellt wurden, gestatten es nicht, eine bestimmte Grenze zu ziehen, jenseits deren die Rippelbildung nicht mehr stattfinden kann.

Es soll nun untersucht werden, welche Vorgänge in der Natur denen im wesentlichen gleichkommen, die bei der Bildung von Rippeln im Experimente massgebend waren. Stehende Wellen und constante Ströme waren, wie bereits erwähnt, geeignet, Rippeln zu erzeugen, deren Eigenschaften je nach den sie bildenden Faktoren verschieden waren.

II. Rippelmarken in der Natur.

1) Entstehung der Rippelmarken.

Die Ansichten über die Bildungsweise der Rippelmarken in der Natur gehen ziemlich weit auseinander. Eine ziemlich allgemein verbreitete Auffassung war die, dass die Wellen ihre Form auf sandigem oder schlammigem Boden abdrücken würden. *Forel,* der selbst dieser Ansicht war,[39]) hat seinen Irrtum später mit den Worten „exemple des erreurs d'imagination d'un naturaliste" hinlänglich gekennzeichnet. Und in der That — es bedarf diese veralterte Anschauungsweise keiner ausführlicheren Widerlegung, da ihre Haltlosigkeit aus den bisherigen Ausführungen hervorgeht. Zudem wäre eine derartige Annahme mit dem Wesen der Wellenbewegung niemals in Einklang zu bringen. Bei einer stehenden Welle, sollte man meinen, könnte man eher von einem Abdrucke sprechen, da die Knotenlinie stets in derselben Niveaufläche liegt, während zu beiden Seiten die Wassermassen sich abwechselungsweise heben und senken, so dass hier eine Depression zu beiden Seiten der Knotenlinie im Sande erzeugt werden könnte. Der Umstand aber, dass die am Boden befindlichen Teilchen sich hin- und herschieben, und dass ferner die Länge einer Wellenfurche nie der Grösse einer Welle entspricht, widerlegt auch diese Vermutung.

Lyell, der Begründer der modernen Geologie, widmet in seinem grundlegenden Werke „Elements of Geology"[40]) den Rippelmarken eine kurze Betrachtung. Er führt ihre Entstehung auf Ströme zurück und vermischt somit beide Arten von Rippeln.

J. Beete Jukes tritt in seinem Buche „Manual of

[39]) Soc. Vaud. sc. nat. s'eance du 16. févr 1870.

[40]) 6th Ed. London 1865. S. 19—21.

Geology“[41]) der Auffassung, dass die Wellen ihre Form dem Boden aufdrücken, entgegen. Er führt daselbst aus, dass die Rippelmarken ihre Entstehung den Strömen verdanken, die durch die Gezeiten erzeugt werden. Diese Ströme rufen, nach seiner Ansicht, am Boden des Wasserbeckens dieselbe Wirkung hervor, wie ein Luftstrom, der an der Oberfläche des Wassers Wellen erzeugt. *De Candolle*, der ebenfalls zu dieser Ansicht gelangte, bediente sich desselben Vergleiches, der, wie erwähnt, nicht gerade ganz passend sein dürfte. Dieser Anschauungsweise von der Entstehung der Rippelmarken darf jedoch keineswegs jede Giltigkeit abgesprochen werden. Sie wäre indessen ohne Zweifel anfechtbar, wenn man sie für alle Arten von Rippeln gelten lassen wollte. Ströme können Rippelmarken erzeugen, die sich allerdings durch ihre verschiedenen Seiten und Böschungswinkel von den regulären Wellenfurchen unterscheiden. Wir finden solche ungleichmässige Wasserdünen im Rinnsal fliessender Gewässer, und es wären demnach solche Rippeln wohl als fluviatile Bildungen anzusehen. Andererseits wäre es denkbar, dass diese Erscheinung auch am Meeresboden angetroffen wird.

Die Meeresströmungen, auf welche *Darwin*[42]) die Bildung der Rippelmarken zurückgeführt hat, kämen hier zunächst in Betracht. Die Theorie von *Zöppritz* über das Wesen und die Entstehung der grossen Meeresströmungen findet neuerdings immer mehr Anhänger. Kapitän *Dinklage* hat den Zusammenhang zwischen den Meeresströmungen und den Winden zweifellos nachgewiesen. Die Untersuchungen, welche *Dinklage* in der Ostsee anstellte, bezogen sich zum Teil auf die Frage nach der Fortpflanzung der vom Winde erzeugten Ober-

---

[41]) Erste Ausg. S. 172 cit. bei Hunt.

[42]) Nature 1882.

flächentrift in grössere Tiefen.[43]) Nach diesen Beobachtungen kann kein Zweifel mehr bestehen, dass der Wind Triftströme erzeugt, welche die tiefer gelegenen Schichten in Bewegung setzen. Aus den theoretischen Untersuchungen von *Zöppritz*[44]) geht ferner hervor, dass die Geschwindigkeit des Stromes an der Oberfläche am grössten ist, mit der Tiefe aber abnimmt, um am Boden sich auf Null zu reducieren. Demnach würde sich eine Bewegung am Boden des Meeres infolge der Oberflächentrift nicht mehr bemerkbar machen. Es würde daselbst kein Material transportiert, so dass die grossen Meeresströmungen ohne Einfluss auf die Gestalt des Bodens wären, falls man von ihrer transportierenden Thätigkeit in den höchsten, der Oberfläche benachbarten Schichten absieht.[45]) *Von Richthofen*[46]) schreibt den Meeresströmungen allerdings Erosionserscheinungen zu, wiewohl er zugibt, dass es in dieser Beziehung „vollständig an Untersuchungen fehlt." Indessen weist er nur auf Meeresengen und Strassen, also auf lokale Strömungen hin, deren Entstehung aber auch auf andere Faktoren, beispielsweise auf die Verteilung des Salzgehaltes und auf die Temperaturdifferenz des Wassers, zurückzuführen ist.

In neuester Zeit hat man nun die Frage ventiliert, auf welche Weise das an der Oberfläche hinweggeführte

---

[43]) Annalen der Hydr. Heft I 1888 cit. bei Krümmel in einem, in den „Münch. Neuest. Nachr." veröffentlichten Aufsatze über „die modernen Theorien der Meeresströmungen."

[44]) Nach Krümmel lautet die Formel (Ozean. II, S. 344) $v_x = v_0 \frac{p - x}{p}$, wobei p die ganze Wassertiefe, x den Abstand der betreffenden Wasserschicht von der Oberfläche bedeutet. Wenn $x = p$, so wird $v_x = v_p = 0$.

[45]) Nach Weule wird bloss Flusstrübe transportiert, die in Salzwasser sich verhältnismässig rasch niederschlägt.

[46]) Führer für Forschungsreisende. S. 375/6.

Wasser ersetzt wird. Versuche und Wahrnehmungen ergaben, dass die sogenannten Compensationsströme diesen Ausgleich besorgen. Wie bereits erwähnt, hat *Ekman* eine stromaufwärts gerichtete Tiefenströmung an der Mündung des Götaflusses constatiert, welche dem starken Compensationsbedürfnis zu genügen sucht. So mag auch in den Meeren eine untere Strömung stattfinden: das wärmere Wasser wird durch die Passate nordwärts entführt, das kältere fliesst vom Pol als untere Strömung in der entgegengesetzten Richtung. Vielleicht wäre es möglich, dass diese kältere Strömung sich bis zum Boden fortsetzt und hier einen merklichen Einfluss auszuüben vermag. Diesbezügliche Beobachtungen, welche fern von der Küste in beträchtlicher Tiefe angestellt werden müssten, liegen nicht vor. *Forel* betont[47]) nun, dass die geologische Thatsache, dass sich Rippeln nur auf Sandsteinen, nicht aber auf dem Kalkstein und Thon abgelagert haben, für den Umstand spricht, dass die Rippeln litorale Gebilde sind.

Und in der That, wie später darauf hingewiesen wird, finden sich die Rippelmarken vorzugsweise auf flachem Strande, und zwar waren sie bis jetzt nur bis zu einer Tiefe von höchstens 200 m. mit Sicherheit zu constatieren. An der Flachküste sind constante Meeresströmungen aber nicht mehr wahrzunehmen. Die Winde sind daselbst von verschiedener Richtung, so dass an permanente Strömungen nicht wohl gedacht werden kann. Auch die Gezeiten scheinen die constanten Meeres-

[47]) „Les rides de fond, très frequemment dessinées sur les grès et mollasses qui sont des formations litlirales, manquent sur les marnes, colcaires et argiles qui sont des formations profondes." „Ph. de la Harpe dit que les ripple-marks s'observent sur les grès et le marnes et pas sur les calcaires; cela prouverait qu'elles ne se forment qu'à une faible profondeur." Bull. de la Soc. Vaud. des sc. nat. Vol. XV, S. 68. Lausanne 1879.

strömungen an der Küste zu beeinträchtigen,[48]) so dass die permanenten Strömungen für die Flachküsten überhaupt nicht in Betracht kommen. Nach *Boguslawski*[49]) ist selbst der Floridastrom und „coldwall“ für die Gestaltung der Unionsküste nicht in Rechnung zu ziehen, und nach *Peschuël-Lösche* ist die Gestaltung der Benguelaküste nicht der Benguelaströmung, sondern der dortigen Brandung zuzuschreiben.[50]) *Weule* und *Philippson* schreiben den zufälligen Windtriften, die sich keineswegs in grössere Tiefen fortzupflanzen brauchen, da die Tiefenschichten nach *Zöppritz* sehr langsam in Mitleidenschaft gezogen werden, immer noch eine grössere Wirkung zu als den permanenten Meeresströmungen. Diese sollen sich übrigens stets jenseits der Hundertfadenlinie vorfinden,[51]) so dass sie auf die Flachküsten und ihre Gestaltung keinen Einfluss zu äussern vermögen. Die permanenten[52]) Meeresströmungen können uns demnach die Entstehung der Rippeln nicht erklären.

Andere Ströme, die eine diesbezügliche Würdigung verdienen, sind die Gezeitenströme. In neuester Zeit haben *von Richthofen*[53]) und *Krümmel*[54]) den Einfluss der Gezeitenströme auf die Morphologie des Flachbodens hervorgehoben. Nach *Krümmel* hat die Gezeitenwelle im wesentlichen dieselben Eigenschaften wie die Welle auf flachem Strande. Die Orbitalbahnen der Wasserteilchen bilden bei ersterer sehr lang gestreckte Ellipsen, deren horizontale Längsachse die vertikale Querachse um

[48]) Deutsche Rundschau f. Geogr. u. Stat. 12. Jahrg. 1890. S. 90.

[49]) Ozeanogr. I. Bd., S. 269.

[50]) Globus XXXII. 1877, 119, 136. Globus L. 1886, 39, 55.

[51]) Weule „Beitr. zur Morphol. der Flachküsten.“ Zeitschr. für wissensch. Geogr. Bd. VIII.

[52]) Der durch die wechselnden Winde zufällig erzeugten Strömungen wird später gedacht werden. (Sog.)

[53]) Führer f. Forschungsreisende. S. 332.

[54]) Petermanns Mitt. Bd. 35, S. 129 ff.

mehrere hundertmal übertrifft. Dabei macht sich die Verschiebung der einzelnen Wasserteilchen bei der geringen Höhe der Welle hauptsächlich in horizontaler Richtung als Strom bemerkbar. Dieser Strom kann eine nicht unbedeutende Intensität erreichen. Nach *Weule*[55]) beträgt die Geschwindigkeit der Gezeitenströme in der Nähe der Winyah-Bay in Südkarolina $2_{,8}$, resp. $3_{,4}$ Seemeilen pro Stunde. *Krümmel* gibt dieselbe im Bristolkanal zu 6, bei den Orkney- und Shetlandsinseln zu 8 bis 9, bei Hangtschou sogar zu $11^1/_2$ Knoten an. Diese Stromgeschwindigkeiten würden, auf die Zeiteinheit reduciert, die Werte $1_{,4}$, $1_{,7}$, 3, 4, $4^1/_2$ und $5_{,7}$ m pro Sekunde liefern. Das arithmetische Mittel dieser Zahlen ist circa ebensogross wie die Geschwindigkeit des Rheines bei Bingen ($3_{,42}$ m pro Sekunde).[56]) In der Nordsee beträgt die Geschwindigkeit der Gezeitenströme 2—3 Knoten ($1—1^1/_2$ m pro Sekunde).

Die Gezeitenströme wären demnach nicht selten so heftig, dass sie imstande sein müssen, Sandmassen zu verschieben. *Comoy*[57]) hat die Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Gezeitenstromes von der Höhe der Flut, ihrer Fortpflanzungsgeschwindigkeit und der Tiefe des Wassers dargethan. Demnach verhält sich die Geschwindigkeit des Stromes (v) zu der der Welle (c) wie die Höhe (h) des Kammes über dem mittleren Niveau zur Tiefe des Beckens (p). Da die Länge der Gezeitenwelle an Flachküsten und in seichten Meeresteilen immerhin noch mehr beträgt wie die 6fache Tiefe des Wassers, so gilt nach *Hagen*[58]) die Formel für die Wellen im

---

[55]) Zeitschr. f. wissensch. Geogr. Bd. VIII.

[56]) Nach Krümmel.

[57]) „Etude pratique sur les marées fluviatiles." Paris 1881 Seite 95.

[58]) Ozeanogr. II, 29. Die Formel $c = \sqrt{2\,p\,g}$ in die Formel $v : c = h : p$ $\left(v = \frac{c.h}{p}\right)$ eingesetzt, ergibt $v = h\sqrt{\frac{2g}{p.}}$

flachen Wasser. *Krümmel* setzt die *Lagrange*sche Formel für die Geschwindigkeit der Welle $c = \sqrt{2pg}$ ein und erhält demnach $v = h\sqrt{\frac{2g}{p}}$. Diese Formel wird zur bequemeren logarithmischen Berechnung in die Formel $v = 6{,}08\ hp^{-\frac{1}{2}} = \left(\frac{6{,}08\ h}{\sqrt{p}}\right)$ übergeführt, wobei die Geschwindigkeit in Seemeilen pro Stunde ausgedrückt wird. In *Petermanns* Mitteilungen führt *Krümmel* die ganze Fluthöhe (H) ein, welche die Höhe der Welle über der mittleren Niveaufläche ums Doppelte übertrifft, woraus die abgerundete Formel hervorgeht $v = \frac{3\,H}{\sqrt{p}}$.

Sobald nun die Höhe der Flutwelle wächst, vergrössert sich auch die Geschwindigkeit des Stromes. Jene wird da aber um ein Beträchtliches zunehmen, wo sie durch seitliche Einengungen gewaltsam in die Höhe gepresst wird. Die Höhe der Flutwelle ist, wie *Krümmel,* sich auf die Untersuchungen *Airys* stützend, erwähnt, indirekt proportional der Quadratwurzel aus der Breite und steht ausserdem noch in umgekehrtem Verhältnis zur vierten Wurzel aus der Wassertiefe.

Daraus folgt nun, dass die Intensität der Strömung in Wasserstrassen, überhaupt in engen und seichten Becken eine sehr grosse sein muss. *Krümmel* hat dies nachgewiesen, und es ergab sich, dass die Geschwindigkeit der Gezeitenströme so intensiv sein kann, dass ihnen sogar Erosionserscheinungen zuzuschreiben sind. Die friesischen Inseln wären längst zu Nehrungen zusammengewachsen, wenn der Westwind und die westliche Küstenströmung allein in Wirksamkeit wären. Der Flutstrom zwängt sich jedoch Tag für Tag zweimal durch die zwischen den Inseln gelegenen Strassen mit solcher Gewalt, dass er diese ausfegt und reinigt und ihre Versandung verhindert. So erodieren die Gezeitenströme.

Ob es der Ebbe- oder der Flutstrom ist, der bei

der Erosion am meisten in Betracht kommt, hängt von der Geschwindigkeit der Ströme ab. *Krümmel* führt eine Reihe von Beispielen an, welche obige Thatsache näher beleuchten. *Weule* kam zu demselben Resultate, und da, wo sich *Krümmels* Theorie nicht bestätigt fand, waren andere lokale Umstände bei der Küstengestaltung in Betracht zu ziehen.

Es ist nun klar, dass die Gezeitenströme an solchen Erosionsstellen keine Rippelmarken bilden können, da ihre Geschwindigkeit eine allzu grosse ist. Wie es aber für die Intensität dieser Ströme ein Maximum gibt, so muss es andererseits auch ein Minimum geben. Nach *Börgen*[59]) beträgt im offenen Meere bei einer Tiefe von 5000 m. und einem Flutwechsel von 1,3 m. die Strömung circa 65 m. pro Stunde. *Krümmels* Formel $v = \frac{3\,H}{\sqrt{p}}$ kann hier nicht mit Vorteil angewandt werden, da sie nur für geringere Tiefen brauchbar ist. Die Strömung in einer Tiefe von 5000 m. ist offenbar so gering, dass auch hier keine Rippelmarken entstehen können. Obige Formel zeigt uns aber, dass wir für eine gewisse Fluthöhe und Wassertiefe brauchbare Werte erhalten müssen, die den Anforderungen, welche bei der Bildung von Rippeln bezüglich der Stromstärke in Betracht kommen, genügen. Dabei ist wohl zu berücksichtigen, dass mit zunehmender Tiefe die Geschwindigkeit der Gezeitenströme einen erheblichen Bruchteil von der, dem Oberflächenstrome zukommenden Bewegungsenergie einbüsst. Daraus folgt, dass die Gezeitenströme Rippelmarken mit verschiedenen Seiten und Böschungswinkeln — die Halbperiode der Oscillation dauert ca. 6 Stunden — erzeugen können. Die durch Ebbe und Flut entstandenen Rippelmarken verändern sich mit der Richtung des Flut- respektive Ebbestroms. Während der Flut ist ihre

[59]) Annalen der Hydr. 1880. S. 9. cit. b. Krümmel.

steilere Seite stets dem Festlande zugekehrt, während der Ebbe ist sie seewärts gerichtet.

Die Gezeitenströme können uns jedoch die Entstehung regelmässiger Rippeln nicht erklären. So weist *de Candolle* darauf hin, dass sich Rippelmarken auch da vorfinden, wo keine Gezeiten und überhaupt keine Strömungen zu bemerken sind. Zudem sind oft genug vollständig symmetrische Wellenfurchen constatiert worden. *Forel* nahm im Januar 1869 von einer Rippelmarke einen Abdruck, der sich jetzt im geologischen Museum zu Lausanne befindet. Das Modell, welches uns ein negatives Bild einer in der Natur gebildeten Wellenfurche repräsentiert, zeigt die vollkommenste Regelmässigkeit, indem sowohl die Seiten als Winkel einander gleich sind. Deswegen sind aber nicht alle, am flachen Strande sich vorfindenden Rippelmarken symmetrisch.

So bemerkt *Forel*, dass man auch in Seen dünenartige Rippeln beobachten könne: „Le fait s'explique facilement par l'intervention d'un courant continu, qui, s'emparant des rides précédemment modeleés par les vagues, les transforme en dunes, en entrainant le sable dans une direction constante. Grâce à la combinaison des courants et des vagues, on peut comprendre qu'il y ait dans une eau dormante, comme un lac ou une mer, tous les intermédiaires possibles entre les dunes et les rides."

Vollständig regelmässige Rippelmarken dürften permanenten Strömen ihre Entstehung kaum verdanken. Der französische Brückeningenieur *Siau*,[60]) welcher bei St. Giles auf der Insel Bourbon (nicht im atl. Ocean, wie *Forel* Arch. d. sc. Bd. X S. 63 bemerkt) Rippelmarken beobachtet und deren Tiefe unterhalb des Wasserspiegels bestimmt hat, führt die Entstehung derselben auf den

[60]) Comptes rendus, tome XII p. 770.

Wellenschlag zurück. Er führt aus, dass, sobald sich der Wellenschlag vermindert, zunächst die grösseren Körner zur Ablagerung gelangen, während die kleineren sich noch hin- und herbewegen und von der Welle emporgehoben werden. Die Woge schiebt, nach *Siaus* Ansicht, die feinen Körnchen schliesslich auf die Kämme der Undulationen hinauf, da sie allein der Welle noch zu folgen vermögen, während die gröberen Körner im Thale bloss gelegt werden.[61]) Mit Recht macht *Krümmel*[62]) darauf aufmerksam, dass es auf diesem Wege niemals zur Bildung von Rippelmarken kommen kann; denn sobald sich die Welle legt, werden sich zunächst die grösseren Körner ablagern und darüber die kleineren und zwar nicht nur an bestimmten Stellen, sondern allerorts, da sich die ganze Wassermasse in Bewegung befindet. Somit wird sich eine Schicht gröberer Körner, die von einer Lage kleinerer bedeckt wird, über den Boden gleichmässig verbreiten.

Wollen wir die Entstehung der regulären Rippelmarken überhaupt auf die Wellenbewegung zurückführen, so müssen wir zunächst, im Anschluss an die Experimente, von der stehenden Welle oder von wechselnden Strömungen ausgehen.

Stehende Wellen sind allerdings in der Natur schon beobachtet worden. *Forel*, der dieses Phänomen im Genfer See eingehend studiert hat, legte ihm bekanntlich den Namen „Seiches“ bei. *Krümmel* führt uns in seiner Oceanographie eine Reihe von Bewegungserscheinungen vor, welche auf stehende Wellen zurück-

---

[61]) „Alors s'est fait un triage, une espèce de départ: les matières légères se sont séparées, ont continué d'avancer par ondulations, comme cela a toujours lieu; le flot agissant au fond du creux pour les porter au sommet, et laissant à nu les corps les plus pesants.“

[62]) Ozeanogr. II. S. 33/34.

zuführen sind. So hat beispielsweise *Aimé*[63]) stehende Schwingungen im Hafen von Algier bemerkt, und ebenso wurden seichesartige Erscheinungen in den nordspanischen Häfen[64]) constatiert. *Krümmel* belegt die Thatsache, dass derartige Schwingungen in der Natur recht wohl vorkommen können mit weiteren Beispielen. In neuester Zeit hat *Burton*[65]) auf Grund einer derartigen Erscheinung die Tiefe des Hakone-Sees mit Hilfe der *Forel*schen[66]) Formel zu berechnen versucht. Diese in der Natur beobachtete Bewegungsart ist indessen rein lokaler Natur und dürfte sich nur in Meeresengen, Häfen und Binnenseen vorfinden. Dass jedoch ganze Meere in solche uninodalen Schwingungen geraten sollen, ist kaum anzunehmen.

Nach *Forel* war nun die Bewegungsart der Sandkörner am Boden des Genfer Sees (es empfahl sich, den Spiegel des Wassers durch Oel zu glätten, um den Vorgang besser beobachten zu können) von derselben Art wie die, welche er in seiner Rinne beim Schaukeln derselben bemerken konnte. „Ce mouvement de balancement pendulaire de l'eau au dessous des vagues superficielles d'oscillation progressive, ressemble en plus d'un point à celui que subit le liquide dans un bassin, où il balance suivant une oscillation fixe uninodale (balancement simple de l'eau dans une cuvette).“

Forel[67]) schloss daher, dass die Fortpflanzungswogen am Boden des Meeres eine Modifikation erleiden, so dass

---

[63]) Ann. de chim. et phy. 1842, V, 423.

[64]) Annal. d. Hydr. 1875. S. 161 f. cit. b. Krümmel.

[65]) Transact. Seismol. Soc. of Japan 1892. Bd. XVI, 49, Peterm Mitt. Bd. 39, S. 198.

[66]) Arch. LVII, 278. Génève, 1876.

[67]) „Il (Hunt) a reconnu, comme moi, que les rides sont causées par le balancement alternatif de l'eau, balancement, qui n'est qu'une modification dans la profondeur du mouvement superficiel plus compliqué des vagues d'oscillation progressive“.

ihre Bewegungsart bei der Bildung der Rippelmarken im grossen ganzen der der stehenden Welle gleichkommt, und *Hunt*[68]) schliesst sich der Ansicht *Forels* an, indem er sich auf die Untersuchungen *Lord Rayleighs* stützt.

Es ist jedoch schwer einzusehen, wie Fortpflanzungswogen auf flachem Strande sich in stehende Wellen umsetzen. Wenn eine Welle auf flachem Strande aufläuft, so wird sie allerdings abgeändert und zwar derart, dass ihre Höhe stets zunimmt, da die Wasserfäden sich nicht mehr nach abwärts verschieben können und demgemäss nach der freien Oberfläche auszuweichen streben.

Bei der symmetrischen Wellenbildung ist es absolut erforderlich, dass jeder Wasserfaden nach einer vollen Wellenperiode in seine frühere Lage zurückkehren kann. Wird nun die Wassertiefe kleiner als die ganze Wellenhöhe,[69]) so kann diese Bedingung nicht mehr erfüllt werden. Der nachfolgende Wellenkamm findet nicht mehr die genügende Wassermasse vor, um seine vordere Böschung auszubilden, so dass diese sich steiler gestaltet, bis endlich der Kamm der Welle überkippt. Auf diese Weise kommt es zur Brandung, aber nie zu stehenden Wellen. *Krümmel* schreibt daher: „Am Strande werden sich im günstigen Falle stehende Wellen nur da einstellen können, wo Wellen reflektiert werden. Das ist aber nur möglich an sehr steilen Uferböschungen, wie sie nur Hafenbassins bei überall gleichmässiger Wassertiefe und Sandgrund zeigen. Aber aus den Beobachtungen von *Hunt* an der offenen englischen Küste, wie aus meinen eigenen am Kieler Hafen, beide stets an ganz flach einschliessendem Sandstrand angestellt, ergab sich vollkommen übereinstimmend, dass weder von reflektierten Wellen, noch sonst von stehenden Schwingungen hier die Rede sein kann. Damit verbietet sich denn auch die

[68]) Proceed. etc. Bd. 34, S. 3.

[69]) Die Untersuchungen Bayleighs und Hagens beweisen dies.

Anwendung jener Experimente zur Erklärung der Wellenfurche im Strandgebiet.“ Somit hätten wir keinen Grund, der uns zu der Ansicht bestimmen könnte, dass nämlich die Fortpflanzungswogen sich am flachen Strande in stehende Wellen umsetzen.

Es mag daher am Platze sein, zu untersuchen, wie die Welle überhaupt auf flachem Boden ihre Wirkung äussert. Die Bewegung der Welle im seichten Wasser ist ziemlich complicierter Art. Die Ansichten der Forscher gehen daher weit auseinander, und die Theorie stimmt nicht immer mit den in der Natur angestellten Wahrnehmungen überein.[70])

Airy tritt mit den Gebrüdern *Weber,* mit *Russel* und *Hagen* sogar in schroffen Gegensatz. Nach *Airy* werden nämlich die Orbitalbahnen der unter einander sich befindlichen Wasserteilchen nicht in derselben Zeit durchlaufen, was gegen die Continuitätsbedingung, die in der Natur stets erfüllt wird, streitet. Es müsste — es ist dies eine Folgerung aus den *Airy*schen Formeln — die Welle, da die einzelnen Wasserteilchen ihre Orbitalbahnen in verschiedenen Zeiten zurücklegen, sich selbst vernichten, ein Umstand, der dem thatsächlichen Vorgang widerstreitet. Die Continuitätsbedingung findet indessen auch in der Theorie gebührende Berücksichtigung in den Untersuchungen, welche die Gebr. *Weber, Russel* und *Hagen* anstellten. Es ergab sich aus ihren Experimenten übereinstimmend, dass die Wellen in flachem Wasser in jeder Tiefenschicht gleichmässig weiterschreiten. In den der Oberfläche benachbarten Schichten, wo die Reibung des Bodens keinen Einfluss mehr ausübt, sind die Orbitalbahnen nahezu Kreisbahnen. Der vertikale Durchmesser nimmt mit zunehmender Tiefe d. h. in den tieferen Schichten ab, während der horizontale Dia-

[70]) Was die bei Krümmel Ozeanogr. II. Bd., S. 28 angeführte Tabelle beweist.

meter nach *Hagen* in allen Schichten nahezu derselbe bleibt, nach den Gebrüdern *Weber* dagegen anfangs etwas ab-, näher dem Boden aber wiederum etwas zunimmt. In grösseren Entfernungen von der Oberfläche beschreiben demnach die Wasserteilchen Ellipsen, deren Längsachse mit der Horizontalen, deren Querachse dagegen mit der Vertikalen zusammenfällt. Diese Ellipsen verflachen sich mit zunehmender Tiefe, um schliesslich am Boden der Wellenrinne in eine Gerade überzugehen. Somit ähneln in der Wellenrinne die Vorgänge, die mit Fortpflanzungswogen angestellt wurden, denen, welche bei stehenden Wellen zu berücksichtigen waren. Sobald die vertikale Achse der Orbitalellipsen sich am Boden auf Null reduciert, und nur noch die horizontale Bewegung in Betracht kommt, müssen sich ebenso wie bei den uninodalen Schwingungen alternierende Strömungen geltend machen, die imstande sind, Rippeln zu erzeugen.

Ob diese im Experimente constatierten Thatsachen in der Natur sich ebenso vollziehen, muss bezweifelt werden. In der Wellenrinne muss naturgemäss der vertikale Durchmesser der Ellipse verschwinden, da der Boden der Rinne starr und unnachgiebig ist. Es muss durch diesen Umstand auf die Bewegung des Wassers, zum mindesten in den unteren Schichten, sich eine Einwirkung der in der Nähe des Bodens verflachten Orbitalbahnen von unten nach oben äussern. Anders wird sich diese Thatsache in der Natur gestalten; denn der Boden des Meeres ist nicht absolut starr wie der der Wellenrinne,[71]) und es brauchen sich daselbst keine regelmässigen Ströme von wechselnder Richtung zu entwickeln, sondern die Welle kann hier ihre ellipsenartigen Orbitalbahnen noch in geringem Masse entfalten. Bei den Gezeitenströmen, die ebenfalls flache Wellen repräsentieren, kann die verti-

[71]) Oceanogr. II. S. 33.

kale Achse recht wohl vernachlässigt werden, da dieselbe nur einen sehr kleinen Bruchteil der horizontalen bildet.

Wenn auch der Boden des Meeres ziemlich nachgiebig gedacht werden muss, so ist es doch immerhin sehr wahrscheinlich, dass er der freien Entfaltung der Welle hinderlicher ist als eine Wasserschicht, die zwar ebensowenig, ja sogar noch weniger zusammengedrückt werden kann, die aber für die Fortpflanzung der Bewegung der einzelnen Wasserteilchen in grössere Tiefen insofern geeigneter erscheint, als sie imstande ist, den vertikalen Stoss der Wasserteilchen aufzunehmen und fortzuleiten. In tiefem Wasser wird daher die vertikale Componente der Orbitalbahnen eher beibehalten, da der vertikale Stoss von den tieferen Wasserschichten aufgenommen wird, die dann selbst aus ihrer Ruhelage geraten und deren Teilchen dann die pendelnde Bewegung mitzumachen streben. Der Meeresboden kann zwar der vertikalen Componente der Orbitalbahnen der Wasserteilchen im gewissen Grade nachgeben, aber er wird kaum fähig sein, den ganzen Stoss aufzunehmen und seitlich fortzupflanzen, wie dies bei einer Wasserschicht der Fall ist. Daher wird in seichtem Wasser die vertikal wirkende Kraft rascher aufgehoben, als die horizontale.

Es wäre somit der Vorgang in der Natur ein ähnlicher wie der in der Wellenrinne. Die vertikale Achse der Orbitalellipsen wird im Meere gleichfalls abnehmen, sie wird am Boden des Meeres ziemlich gering werden, während sie sich in der Rinne wegen des starren Untergrundes auf Null reduciert. Demnach haben die Wasserteilchen auf dem Grunde seichter Meeresteile im allgemeinen mehr das Bestreben hin- und herzupendeln, wie sich nach auf- und abwärts zu bewegen. Die Tendenz der Wasserteilchen, ihren Ort hauptsächlich in der Richtung der Horizontalen bald in dem einen, bald in dem andern Sinne zu verändern, dürfte bei der Bildung von

Rippelmarken in Frage kommen. Nach *Darwin* spielen ausser dieser horizontalen Bewegungsart der Wasserteilchen die Wirbel bei dem Aufbau der Rippeln eine bedeutende Rolle. Es ist nun nicht recht einzusehen, wie diese Wirbel auf flachem Meeresgrunde entstehen, wenn wir bedenken, dass den Wasserteilchen noch eine vertikale, wenn auch sehr kleine Bewegung innewohnt, so dass die Sandteilchen die Neigung haben, sich vom Boden des Meeres zu entfernen.[72]) Bei diesem Bestreben werden sie über kleinere Unebenheiten leicht hinweggehoben, so dass diese sich nicht vergrössern können, und somit werden auch die Wirbel nicht in Kraft treten. In der Wellenrinne wandern die Sandteilchen am Boden horizontal hin und her, so dass sie an kleineren Hindernissen recht wohl Sandanhäufungen verursachen können, die ihrerseits wieder zur Entfaltung der Wirbel beitragen.

Krümmel hat nun die Erfahrung gemacht, dass sich frische Rippelmarken nur nach auflandigem Winde im Kieler Hafen gebildet haben, und er entnimmt aus den Beobachtungen *Hunts* dasselbe Resultat. *Hunt* ist allerdings der Ansicht,[73]) dass die Richtung der Rippelmarken nichts zu thun hat mit der des Windes. Er glaubte zu diesem Schlusse berechtigt zu sein, da er Wellenfurchen von verschiedener Richtung in der Tor-Bay beobachtete. Diese Unregelmässigkeiten in der Richtung der Rippeln sind aber kein Beweis dafür, dass der Wind ohne Einfluss ist auf ihre Richtung, vielmehr beweisen *Hunts* Beobachtungen nur, dass ausser der Richtung des Windes und der von ihm im gewissen Sinne abhängigen Welle noch andere Faktoren – wie später ausgeführt wird — für die Richtung der Rippelmarken massgebend sein müssen.

[72]) Nach Krümmel wird zudem durch die vertikal wirkende verkleinerte Kraft der Welle der Boden etwas aufgewühlt.

[73]) Proc. Bd. XXXIV, S. 6 und 7.

Krümmel versichert also, dass er frische und schöne Rippelmarken stets nach auflandigem Winde bemerkt habe. Er führt nun ihre Entstehung auf den Wellenschlag zurück, der im Vereine mit dem Sogstrome eine ähnliche Erscheinung zustande bringt wie die Brandung, welche die Riffbildung an sandigen Küsten bewerkstelligt. Der Sogstrom (von Saugen) ist auf den Überdruck des Wassers zurückzuführen. Sobald der Wind über ein Wasserbecken streicht, wird er an der Leeseite Wassermassen anhäufen, während an der Luvseite eine Depression unter dem Niveau der Ruhelage gebildet wird. Die Engländer *Colding* und *Ferrel* erforschten die dabei in Betracht kommenden Gesetze, und es ergab sich, dass der Staueffekt im umgekehrten Verhältnisse steht zur Tiefe des Beckens, dagegen direkt proportional ist der Länge desselben, dem Quadrate der Windgeschwindigkeit und dem Cosinus des Winkels, den die Windrichtung mit dem Niveau des Beckens einschliesst.

Um nun die Niveaudifferenz auszugleichen, die durch den Windstrom erzeugt wird, sucht das Wasser von der Lee- nach der Luvseite abzufliessen. Unten begegnet der der See zu fliessende Strom geringeren Widerständen, weshalb er sich vorzugsweise am Boden des Beckens geltend macht. Dieser Unterstrom soll sich nach *Krümmel* in der Ostsee derart bemerkbar machen, dass er beim Baden die Füsse seewärts zu ziehen vermag, und *Forel* behauptet, dass er kräftig genug wäre, um die Netze der Fischer zu verwirren und zu zerreissen.[74])

Krümmel gibt eine Reihe von Beispielen, die den Beweis für die Brauchbarkeit der *Colding*schen[75]) Formel $h = 0{,}000001526 \frac{l}{p} w^2 \cos \alpha$ liefern.

[74]) Arch. d. sc. phys. et nat. Bd. XV, S. 407.

[75]) h = Diff. zwischen dem Wasserstand auf der Lee- = und dem auf der Luvseite, l = Länge des Bassins, p = Tiefe des Wassers, w = Windgeschw., α = Winkel des Windes mit der Oberfläche des Wassers.

Der Sog macht sich fast in allen Meeren bemerkbar, was durch den Verlauf der Tiefenisothermen festgestellt werden konnte. An der Leeseite der Küste fliesst nämlich der warme Oberflächenstrom abwärts, während das kalte Auftriebwasser an den Luvküsten in die Höhe steigt.[76]) Die Temperaturverhältnisse der Wasserschichten in verschiedenen Tiefen lassen diesen Schluss zu, und *Krümmel* führt (S. 307—320 Ocean. II.) eine Reihe von Beobachtungen an, die diese Thatsache näher beleuchten, während *Puff* in neuester Zeit das Auftriebwasser an der Ostseite des nordatlantischen und an der Westseite des nordindischen Oceans untersucht hat.[77]) Dass der Sogstrom sich auch in kleineren Becken bilden kann, beweisen die Beobachtungen *Forels,*[78]) welche er an einem kleinen Moränensee im Saasthale anstellte.

Die Erscheinung des luvwärts gerichteten Unterstroms oder Sogs scheint demnach eine ziemlich allgemein verbreitete Thatsache zu sein, die bei auflandigem Winde im Meere, in Binnenseen bei jeder Richtung des Windes zu Tage tritt.

Ein dem Sog vergleichbarer Unterstrom kommt auch bei der Brandung zur Geltung.[79]) Dieser, der Richtung der Welle entgegenströmende Sog ist für die Gestaltung des Flachbodens von nicht zu unterschätzender Bedeutung. *Hagen, Krümmel*[80]) und *Ackermann*[81]) schreiben

[76]) Der erste, welcher diesen Vorgang erwähnt, war Dinklage, dem nach Supan das Prioritätsrecht zuzuerkennen ist, da er in der Zeitschrift „Hansa" 1875, S. 57 dieser Thatsache gedenkt, also bereits vor Toynebee (1882) und Witte (1878), die beide vorübergehend für die Entdeker des Auftriebwassers (Ann. der Hydr. 1887, S 25) gehalten wurden. S. Peterm. Mitt 1891, S. 215 und 293.

[77]) Peterm. Mitt. Bd. 37. Litteraturb. No. 1882.

[78]) Arch. d. sc. ph. et nat. 3pér. Bd. XII, S. 489 f.

[79]) v. Richthofen. Führer f. Forsch. S. 344.

[80]) Ozeanogr. II. Bd., S. 106/07.

[81]) Phys. Geogr. d. Ostsee S. 43. cit. bei Weule, Zeitschr. f. wiss. Geogr. 8 Bd., S. 230.

diesem Soge im Verein mit der nachfolgenden Brandungswoge die Entstehung der Sandriffe oder Schaare zu. Da, wo jener Unterstrom der vorhergehenden Welle mit der nachfolgenden Welle zusammentrifft, tritt relative Ruhe ein, so dass das mitgeführte Material daselbst zur Ablagerung gelangt. Diese Ablagerungen sind freilich bei jedem Winde andere; da aber an jeder Küste eine bestimmte Windrichtung die vorherrschende ist, so bilden sich Reihen von Sandriffen aus, die unter einander und gewöhnlich mit dem Ufer parallel verlaufen und durch tiefe Wasserrinnen von einander getrennt sind.

Eine ähnliche Erscheinung mag die der Wellenfurchen sein. Dem Soge nämlich, der durch Stauung der Wassermassen infolge des auflandigen Windes erzeugt wird, und der sich nach *Krümmel* als langsamer, seewärts gerichteter Strom geltend macht, ist wohl im Vereine mit der Welle die Entstehung der Rippelmarken zuzuschreiben.

Dieser am Boden seewärts dahingleitende Strom wird durch die Orbitalbewegung der Wasserteilchen bald verstärkt, bald gänzlich aufgehoben und zur Umkehr gezwungen. Die vorzugsweise horizontale Bewegung der Wasserteilchen ist nämlich eine wechselnde und zwar derart, dass diese in und unter dem Wellenkamme dem Soge entgegeneilen, in und unter dem Wellenthale dagegen in derselben Richtung ziehen. Bald wird der Sog im Vereine mit der im Thale seewärts gerichteten Bewegung der Wasserteilchen die Sandkörnchen in dieser Richtung fortzureissen suchen, bald wird er aber von der heftigeren Bewegung der unter dem Kamme befindlichen Teilchen zum Stillstand, sogar zur Rückkehr gezwungen. Demgemäss wird, wie bei der Riftbildung eine Pause relativer Ruhe eintritt, hier eine örtliche Aufstauung der Sandkörner stattfinden. Sobald aber eine Sandanhäufung entstanden ist, können sich Wirbel

bilden, die abwechselnd, wie *Darwin* zeigte, an dem Aufbau der Wellenfurche sich beteiligen. Auf diese Weise entstehen Wellenfurchen, die im allgemeinen bei auflandigem Winde unter einander parallel sind und gleichzeitig parallel zur Küste verlaufen.

Es hat nun den Anschein, als ob diese soeben erörterte Theorie von der Entstehung der Rippelmarken, wie sie *Krümmel*[82]) vertritt, nicht imstande wäre, die Regelmässigkeit der Rippeln zu erklären. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass von verschiedenen Seiten Wellenfurchen constatiert wurden, welche sich durch die vollkommenste Symmetrie auszeichneten (gleiche Seiten und Winkel).

Nach *Krümmel* wäre diese Bedingung — oberflächlich betrachtet — nicht vollständig erfüllt; denn die, bald in dem einen, bald in dem andern Sinne wirkende bewegende Kraft ist in beiden Fällen nicht gleich. Sobald sie seewärts gerichtet ist, wird sie gleich der Summe der Geschwindigkeit der Orbitalbewegung und der des Soges sein, sobald sie indessen die entgegengesetzte Bewegungsart beginnt, werden sich diese beiden Grössen differenzieren. Trotzdem können und müssen regelmässige Rippeln entstehen. Der Sog beträgt nämlich nur einen kleinen Bruchteil von der Orbitalgeschwindigkeit der Wasserteilchen, so dass die Summe und Differenz der beiden in Betracht kommenden Faktoren nicht wesentlich verschieden sind. Zudem kommt die Summe respektive die Differenz beider Bewegungsarten nur im Anfangsstadium der Rippelbildung zur Geltung. Es muss darauf hingewiesen werden, dass zunächst der auflandige Wind nachlässt und mit diesem Windstau und Sog, während die Wellenbewegung noch eine Zeit lang fortdauert. Sollten etwa die bis zum Abflauen des

[82]) Ozeanogr. II. Bd., S. 323 f.

Windes entstandenen Rippeln nicht vollständig symmetrisch sein, so würden sie eine symmetrische Gestaltung dennoch erhalten infolge der Wellenbewegung, die, wie erwähnt, sich vorzugsweise als horizontale Verschiebung der Wasserteilchen in der Nähe des Bodens geltend macht, als eine Bewegungsart, welche, nachdem einmal Rippeln entstanden sind, Wirbel erzeugt, die von gleicher Intensität und Wirkung abwechselungsweise sein müssen. Somit erklärt obige Theorie zugleich die Regelmässigkeit der Wellenfurchen und deren Zustandekommen.

2) Richtung der Rippelmarken.

Nach *Krümmel* wären die Wellenfurchen im grossen ganzen einander parallel. Diese Annahme widerspricht jedoch den Beobachtungen *Hunts*, der an der Küste von England (in der Tor Bay) Rippelmarken, welche die verschiedensten Richtungen einnahmen, constatierte.

Forel führt nun aus, dass die Rippeln im allgemeinen sich parallel zu den Kämmen der Welle ablagern, doch gibt er andererseits zu, dass auch Ausnahmen von dieser Regel vorkommen können; besonders seien diese in der Nähe der Küste ziemlich häufig. So beobachtete er Wellenfurchen, die mit der Richtung der Welle und der des Windes nichts zu thun haben. Wir sahen bereits, dass die Richtung der Rippelmarken im allgemeinen parallel ist zu der der bewegenden Kraft, dass indessen auch die Terrainverhältnisse einen gewissen Einfluss äussern. Sobald sich in einer Bucht bei heftigem Wellenschlag grosse Wellenfurchen gebildet haben, werden dieselben ihre Gestalt beibehalten, wenngleich der Wind seine Richtung verändert. So constatierte *Forel* Rippelmarken,[83]) die vom 18. Januar bis 25. April

[83]) Arch. d. sc. phy. et nat. Bd. X, S. 67 f. — Forel erzählt sogar, dass er dieselben Rippeln in der Nähe von Morges 24 Jahre

1883 dieselben blieben, wiewohl die Winde, was sowohl ihre Heftigkeit als auch ihre Richtung anbelangt, während dieser 3 Monate sehr verschieden waren. Am 23. Juni 1883 waren die Rippelmarken schliesslich verschwunden, da stärkere Stürme den Boden unterdessen aufgewühlt und die Rippeln zerstört hatten.

Diese Beobachtungen *Forels* erklären uns zum Teil die Thatsache, dass die Wellenfurchen nicht parallel zu sein brauchen. Wenn der Wind beispielsweise gewisse Teile einer Bucht bestreicht, während andere im Windschatten gelegene Partien von jenem nicht berührt werden, so können sich in den, dem Winde ausgesetzten Teilen der Bucht Rippeln bilden, deren Richtung der des Windes entspricht. Verändert der Wind seine Richtung, so werden die bereits gebildeten Rippeln unter Umständen unverändert bleiben, während nun in den, vorher im Windschatten gelegenen, jetzt aber vom Winde bestrichenen Teilen der Bucht neue Rippeln entstehen, deren Richtung mit der der zuerst gebildeten Wellenfurchen nicht übereinzustimmen braucht. Diese Thatsache wird sich in stark gegliederten Buchten oft genug verwirklichen, und, soviel aus *Andrees* Handatlas (2te Aufl. Karte 70/71 C_6) ersichtlich ist, trifft diese Bedingung für die Tor Bay zu.

Die verschiedene Streichungsrichtung der Rippeln könnte auch auf die verschiedene Korngrösse des Sandes zurückgeführt werden. Im allgemeinen finden sich grobe und feine Körner in ein und derselben Wellenfurche vor. Es können sich aber auch da, wo feiner Sand den Boden bedeckt, unter gewissen Bedingungen Rippeln bilden, die nicht parallel zu sein brauchen denen, die sich aus grobkörnigem Sande aufgebaut haben, da beide Arten von Rippelmarken nicht demselben Winde ihre Entstehung

---

lang beobachtet habe. (Bull. de la Soc. Vaud. des sciences nat. vol. XV. Lausanne 1879 S. 77.)

notwendigerweise zu verdanken haben, indem die grösseren, aus grobem Material gebildeten Wellenfurchen bei heftigem Wellenschlag entstanden sein können, bei dem sich die kleineren Rippeln überhaupt nicht zu bilden vermochten. Letztere werden sich erst dann ablagern, wenn die Intensität der Welle nachgelassen hat. Sie werden zunächst der Richtung der grösseren Wellenfurchen parallel werden, können aber später durch andere Winde zerstört und neugebildet werden, während diese nicht immer imstande sein werden, auch die grösseren Rippelmarken umzugestalten. Daher kommt es auch, dass öfters 2 Systeme von Rippeln beobachtet wurden, die übereinander gelagert waren, indem die kleineren, aus feineren Körnchen gebildeten Rippeln die grösseren kreuzten.[84]) In einer Bucht kann der Wind, wenngleich er aus verschiedener Richtung weht, ein auflandiger sein. Diese Thatsache erklärt uns das Vorhandensein zweier Systeme von Rippeln, die senkrecht zu einander stehen.

Dass die Rippeln keineswegs parallel zu einander zu sein brauchen, hat auch *de Candolle* erkannt. Er erklärt die Beobachtungen *Hunts,* indem er darauf hinweisst, dass die Welle, welche vom Winde erzeugt wird, sich nach allen Seiten hin fortpflanzt, so dass ihr Kamm nicht unbedingt senkrecht zu stehen braucht zur Richtung des Windes. Besonders trifft dies für Wellen zu, die auf Winde zurückzuführen sind, welche weit von der Küste in Wirksamkeit treten. „*Ainsi*[85]) s'expliquent les faits observés par *Forel* dans le *Lac Léman,* soit par *Hunt* sur les côtes d'Angleterre.

Wir sahen oben, dass die horizontale Gliederung der Küste die Richtung der Wellenfurchen beeinflussen

[84]) Forel, Arch. Bd. X, S. 71/72; Hunt, Proc. Bd. XXXIV, S. 6 und 7; Lyell „Elements of Geology 6. Ed." London 1865 S. 19—21.

[85]) Arch. d. sc. ph. et nat. Bd. IX, S. 269.

kann. Die vertikale Gestaltung des Strandes kommt dabei nicht minder in Betracht. *De Candolle*[86]) weist darauf hin, dass sich im Experimente die Rippeln weniger regelmässig gestalteten, sobald er sie auf geneigtem Boden erzeugte.

Und in der That, die Richtung der Wellen wird modifiziert, sobald dieselben nicht senkrecht, sondern schief zum flachen Strande verlaufen. Die Geschwindigkeit der Welle ist nämlich proportional der Quadratwurzel aus der Tiefe. Der Wellenkamm wird daher nahe am Ufer eine Verzögerung erleiden und zurückgehalten werden, während der seewärts gerichtete Teil des Wellenkammes vorauszueilen strebt. Am Strande werden die Wellenkämme daher fast parallel zur Küste, so dass ihre Bewegungsrichtung nahezu senkrecht zur Uferlinie sich gestaltet.[87]) Dies trifft umsomehr zu, je flacher der Strand ist. Buchten, deren Strand nach verschiedenen Seiten abfällt, werden daher nicht immer Rippeln von derselben Richtung aufzuweisen haben, obwohl diese eventuell durch denselben Wind und dieselben Wogen gebildet wurden.[88])

Ebenso sind Hindernisse am Boden, Erhebungen, beispielsweise Steine imstande, die Richtung der Rippeln zu verändern, so dass es sogar möglich ist, dass auf

---

[86]) Arch. etc. Bd. IX, S. 252.

[87]) Oceanogr. II. S. 86.

[88]) Weule (Beitr. zur Morphol. d. Flachküsten) schreibt der schief auflaufenden Welle eine grosse Bedeutung beim seitlichen Transport der Sandkörner zu und führt diese Thatsache auf den Umstand zurück, dass die Wasserteilchen sich nicht in denselben Bahnen zurückbewegen, in der sie vorwärts gegangen. Somit werden nach Weule die Orbitalbahnen der Wasserfurchen infolge des Terrains ebenfalls umgestaltet. Philippson pflichtet Weule in dieser Beziehung bei und schlägt für die seitlich transportierende Thätigkeit der schief auflaufenden Welle das Wort „Küstenversetzung" vor. (Peterm. Mitt. Bd. 37. Litterb. No. 496.)

einem verhältnismässig kleinen Raume Rippelmarken sich vorfinden, die nach allen Richtungen verlaufen. *Forel* gibt uns ein Bild[89]) einer derartigen Erscheinung, die er bei Ouchy zu beobachten Gelegenheit hatte. Es lässt sich nach *Forels* Zeichnung die allgemeine Richtung der Wogen feststellen, da die meisten Rippeln einander parallel sind; in der Nähe der Steine sind sie allerdings sehr unregelmässig, was vielleicht als Interferenzerscheinung aufzufassen ist.

Dass die Bodengestaltung und die lokalen Verhältnisse einen nicht zu unterschätzenden Einfluss äussern auf die Ablagerung der Rippelmarken, konnte ich wenigstens für Wasserdünen vielfach beobachten. Die Stromfurchen, welche sich im Kaltenbrunner Bache bei Neustadt a/H. vorfinden, sind grösstenteils senkrecht zur Richtung der sie bildenden Kraft. Da, wo der kleine Bach eine Krümmung zeigt, wo Unebenheiten vorkommen, trifft diese Regel nicht mehr zu. Strudelartige Bewegungserscheinungen erzeugen auf einem kleineren Raume Rippeln von allen Richtungen. Ich konnte bisweilen Stromfurchen am Ufer constatieren, deren Richtung parallel zum Ufer verlief. Diese Rippeln befanden sich da, wo der ca. 60 cm. breite Bach eine Krümmung vollzog. In der Mitte kam es zu keiner Rippelbildung, da das Gefälle längs des Stromstriches zu stark war. Der Grund ist der, dass infolge des Überdruckes, der in der Mitte des Baches durch die über das Gestein herabfallenden Wassermassen erzeugt wird, kleine Wellen entstehen, die sich gegen das Ufer hin fortpflanzen und im Verein mit einem vom Ufer nach der Mitte zu gerichteten Compensationsströmchen kleine Rippeln zu bilden imstande sind. Auch in der Mitte des Rinnsales sah ich zuweilen Rippelmarken, die in der Richtung des

[89]) Arch. Bd. X, Pl. I, Fig. 6.

Stromes verliefen, ohne dass der Stromstrich das Ufer gewechselt hätte. Diese Rippeln waren stets auf ein Hindernis z. B. auf einen Zweig, der am Boden lag, zurückzuführen. In der Nähe desselben waren keine Rippelmarken zu bemerken, da die Strömung zu stark war. Auf der Leeseite war ein Strich relativ ruhigen Wassers sichtbar, so dass sich der Sand unter diesem Striche ablagern konnte. So bildete er eine Rippelmarke, die parallel zum Strome verlief. Einige Tage, nachdem ich den Zweig entfernt hatte, war die Rippelmarke verschwunden. Es ist dieser Umstand dafür ein Beweis, dass das fragliche Hindernis wirklich schuld an der Entstehung der auf der Leeseite gebildeten Rippelmarke war.

Aus diesen Betrachtungen geht hervor, dass die Rippeln nicht immer parallel zu sein brauchen, und *Hunts* Wahrnehmung mag somit eine Erklärung gefunden haben. Je verwickelter die lokalen Verhältnisse sich gestalten, desto unregelmässiger muss, was obige Betrachtungen folgern lassen, die Richtung der Rippeln werden.

3) Abnorme Rippelmarken.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass von verschiedenen Forschern sogar abnorme Bildungen constatiert wurden. So beobachteten *Lyell, Hunt* und *Forel* ein System grösserer Rippeln, deren Furchen von einem System kleinerer Wellenfurchen senkrecht gekreuzt wurden, eine Erscheinung, die viel gemein hat mit der der doppelt geritzten Gletscherschliffe und vorher ihre Erklärung fand. *Forel* hat ausserdem Gelegenheit gehabt, ein System von Rippeln zu beobachten, dessen einzelne Wellenfurchen parallel zu einem andern Systeme derart abgelagert waren, dass abwechselungsweise eine grössere, nachher eine kleinere, dann wieder eine grössere Wellen-

furche folgte u. s. w. *Candolle*, *Forel*[90]) und *Darwin* gelang es, beide Systeme von Rippeln herzustellen. Es folgt aus den diesbezüglichen Versuchen, dass die grösseren Rippelmarken die ursprünglicheren sind und aus gröberen Körnern bestehen, während die kleineren Rippeln von feineren Sandteilchen gebildet werden. *Darwin* erklärt uns diesen Vorgang. Wenn die Sandkörner von verschiedener Grösse sind, so kommt es zuweilen vor, dass sehr feine Körnchen bei allzu heftiger Oscillation von den Baumwirbeln erfasst und in wirbelartiger Bewegung fortgerissen werden, so dass sie sich zuerst an der Wurzel des Tintenbaumes ablagern können, wenn die Bewegung nachgelassen hat. Die übrigen Unregelmässigkeiten in der Bildung der Rippeln beziehen sich nicht auf das gegenseitige Verhältnis zweier Systeme, sondern nur auf eine abnorme Gestaltung einzelner Wellenfurchen.

Forel bemerkte am 17. August 1875 bei Bex Rippelmarken, deren Kamm schwarz war, während der übrige Teil die graue Farbe des Sandes zeigte. *Forel* erklärt uns diese Thatsache. Er nahm an, dass der Gipfel dieser Wellenfurchen aus schwarzem, leichterem Humus bestehe, der am Ufer des Rhône verbreitet ist. Er trübte daher das Wasser in einer Bucht, in der sehr helle Rippeln sich vorfanden, und alsbald war der Gipfel von diesem dunklen Humus bedeckt. Es ist klar, dass diese leichteren Massen, welche den Gipfel einer Düne aufbauen, eher weggeschwemmt werden können wie die schwereren Sandkörner, die die Basis der Rippeln bilden. Auf diese Weise, meint *Forel*,[91]) seien die Rippeln entstanden, die er uns Pl. I Fig. 9 vorführt. Es wären demnach Rippeln, deren Kämme durch Erosion Not gelitten hätten, so dass sie einen gezackten Kamm auf-

[90]) Forel, Arch. X, S. 71.

[91]) Bull. d. la Soc. Vaud. d. sc. nat. Lausanne 1879. S. 77.

weisen. Vielleicht sind die Rippeln mit dreifach gezacktem Kamme, deren Bild uns *Forel* Pl. I Fig. 8 vor Augen führt, auf dieselbe Weise entstanden.[92]) Es scheint diese Anomalie übrigens sehr selten aufzutreten. Ausser den Andeutungen *Forels,* die sich bloss auf 2—3 Exemplare beschränken, finden sich keine vor. Schliesslich sei noch erwähnt, dass die ursprünglich scharfen Kämme der Rippeln sich mit zunehmendem Alter verflachen, und dass Tiere, die am Boden ruhiger Binnengewässer oder des Meeres sich fortpflanzen, imstande sind, Spuren ihrer Wanderung auf den Rippeln zurückzulassen.

Im allgemeinen werden Rippeln in grösserer Tiefe oder auch solche aus gröberem Material sich besser conservieren, wie die, welche im Schlamme oder nahe an der Oberfläche gebildet wurden. In diesem Falle ist eine mässige Wellenbewegung imstande, die Wellenfurchen umzugestalten, während in grösseren Tiefen eine stärkere Wellenbewegung stattfinden muss, um ihre Wirkung daselbst noch zu äussern.

4) Tiefe und Grösse der Rippelmarken.

Die Frage nach der Tiefenwirkung der Wellen wurde vielfach im Einklang mit der nach dem Vorkommen von Rippeln zu lösen versucht. Es kann kein Zweifel bestehen, dass beide Fragen zusammenhängen, obwohl sie keineswegs als identisch aufzufassen sind. Das Vorhandensein von symmetrischen Rippeln lässt einerseits einen Schluss auf die Wirkung der Wellen zu, andererseits muss jedoch zugegeben werden, dass da, wo noch eine Bewegung der Wasserteilchen infolge des Wellenschlages stattfindet, keine Rippeln zu entstehen brauchen, da ja nicht jede Bewegung hinreicht, um diese Erscheinung ins Leben zu rufen.

[92]) „Je ne sais pas expliquer cette forme".

Es scheint nun — und diese Thatsache spricht für den Umstand, dass die Rippelmarken in erster Linie auf die Wellenbewegung zurückzuführen sind — dass Wellenfurchen in Binnenseen auf eine geringere Tiefe beschränkt sind als im Ocean, wo grössere Wellen vorkommen.[93]) *Forel*[94]) vermochte am 16. Februar 1878 bei günstigen Bedingungen den Boden des Genfer Sees bis zu einer Tiefe von 12 m zu erblicken; er konnte die Rippeln aber bloss bis zu einer Tiefe von $6{,}_5$ m constatieren. Bei einer andern Gelegenheit[95]) bemerkte *Forel* das plötzliche Verschwinden der Wellenfurchen in einer Tiefe von ungefähr $9{,}_1$ m in der Gegend von Morges. *Forel* untersuchte den Genfer See auch in grösseren Tiefen auf Rippeln, indem er zahlreiche Abdrücke in Tiefen von 30—100 m machte. Es fanden sich jedoch nicht die geringsten Spuren auf der Abgussplatte vor, die auf das Vorhandensein von Rippeln hätten schliessen lassen.

Im Meere sind die Wellenfurchen in grösseren Tiefen constatiert worden. *Hunt* hat seine Aufmerksamkeit speciell dieser Frage zugewandt.[96]) Er hat sowohl durch Experimente, als auch durch zahlreiche Beobachtungen in der Natur, die er oder erfahrene Seeleute angestellt, die Tiefenwirkung der Welle zu bestimmen versucht. Auf dem Wege des Versuchs gelangte er zu dem Resultate, dass die Welle in der Rinne sich noch in einer Tiefe, welche ihrer 62fachen Höhe gleichkam,[97]) geltend machte. In der Tor Bay

---

[93]) Abgesehen von dem in Betracht kommenden Sog. Der Sog nimmt mit der Länge des Beckens an Stärke zu.

[94]) Bull. etc. Vol. XV. Lausanne 1879. Die grösste Tiefe, bis zu welcher Forel einen weissen Gegenstand überhaupt zu erblicken vermochte, betrug 17 m. (Arch. etc. Bd. XII, p. 489 f.)

[95]) Bull. etc. 1879, S. 77 und Arch. Bd. X, S. 62.

[96]) Proc. etc. Bd. XXXIV, S. 8—17.

[97]) Proc. etc. Bd. XXXIV, S. 17.

konnte er die Aufwühlung des Bodens in einer Tiefe von 6 Faden constatieren. Am Eingange derselben müssen sich die Wellen am Boden in einer Tiefe von 15 Faden noch bemerkbar machen, da die Muscheln, welche *Hunt* von Fischern erhielt, und die aus dieser Tiefe stammten, Spuren von Verletzungen zeigten, welche beweisen, dass die Muscheln von den Wellen hin- und hergeworfen wurden. Dieselbe Thatsache konnte *Hunt* auch an Muscheln constatieren, die ihm von dem Kapitän des Schiffes „Pelikan" zur Untersuchung übersandt und in Tiefen von 36, 38, 41 Faden gefangen wurden. Von 85 Exemplaren zeigten 58 deutlich die Spuren eines dereinstigen Existenzkampfes. Der „Pelikan" fand 20 Meilen südöstlich von Startpoint ein Gefäss, das in einer Tiefe von 36—37 Faden gehoben wurde. Wenn man das Gefäss auf die Seite legt, so ergibt sich, dass die Öffnung des Halses ungefähr $9^1/_2$ Zoll über dem Boden (d. h. seiner Seite) hinwegragt. In diesem Gefässe befanden sich Schlammassen und einige Steinchen, so dass *Hunt* mit Recht aus diesem Umstande schliessen konnte, dass der Inhalt des Gefässes nur dadurch in dasselbe geriet, dass sich entweder das Gefäss selbst oder dessen Inhalt oder auch beide bewegen mussten, was auf eine Einwirkung der Welle in einer Tiefe von 36—37 Faden schliessen lässt. Die Möglichkeit, dass das Gefäss, als es verloren wurde, bereits mit Schlamm gefüllt war, kann allerdings nicht geleugnet werden. Da es aber auf der unteren Seite bis zur Hälfte sehr schmutzig und somit in dem Schlamme eingegraben war, so geht dennoch daraus hervor, dass eine derartige Tiefenwirkung der Welle unter allen Umständen stattfand. *Hunt* stützt sich ferner auf die Aussagen von *Nautikern*[98]) und auf gewisse Anzeichen in der Natur. So erklärt er die

[98]) Proc. XXXIV, S. 14 f.

Thatsache, dass gewisse Seeanemonen, wie die Adamasia palliata sich an den Einsiedlerkrebs[99]) klammern, auf eine ganz einfache Weise. Die Adamasia palliata würde grosse Wellen kaum überleben, wenn sie nicht Schutz an einer, von dem Einsiedlerkrebs bewohnten Schale suchen würde. *Hunt* hat sich in seiner Rinne davon überzeugt, dass der Krebs, sobald er die Wellenbewegung bemerkt, die Füsse ausstreckt, um sich so eine möglichst breite Basis zu verschaffen und den Wellen zu trotzen. „The crab keeps the shell from rolling, and the anemone from being killed." *J. Gwyn Jeffreys*[100]) berichtet uns, dass der Stockfisch an der nordamerikanischen Küste (Neufundlandsbank 30—50 Faden) mit besonderer Vorliebe der Mya truncata nachstellt, die gewöhnlich in einer Tiefe von 8—10 Zoll unter dem Sande vorkommt und wahrscheinlich ihren Ort nicht verändert. *Hunt* ist der Ansicht, dass die Wogen imstande sind, den Boden bis in diese Tiefe aufzuwühlen, so dass der Stockfisch seine Lieblingsnahrung leicht zu finden vermag. Diese Bewegungserscheinungen sind nun so heftig, dass wir annehmen müssen, die Rippelmarken müssten sich noch in viel grösseren Tiefen vorfinden.[101])

---

[99]) Allg. Erdkunde von Hann, Hochstetter und Pokorny. Fig. 243, S. 535.

[100]) British Conchology, vol. III, p. 69.

[101]) Es kann bei den Untersuchungen Hunts nur von Wellen die Rede sein, nicht aber von constanten Strömen, da diese viele Mollusken, welche sich nur wenig oder gar nicht bewegen können, mit Sand bedecken und begraben würden. Godwin Austen (Natur. Hist. of the Europ. Seas S. 233) ist ebenfalls der Ansicht, dass eine Treibsandzone (driftsandzone) für das marine Leben ausserordentlich ungünstig ist. Dass dieses in der Tor Bay dennoch existiert, schreibt er dem Umstande zu, dass die Sandmassen, da diese Bucht von dem Winde geschützt ist, sich nicht zu bewegen vermögen. Viele Muscheln gehen allerdings zugrunde, wenn infolge heftiger Winde die Wassermassen der Torbay bewegt werden, andere überleben jedoch den Angriff der Wogen.

Die Frage nach der Tiefenwirkung der Wellen, eine Frage, die für die submarine Denudation von Bedeutung sein dürfte, wurde ferner noch von anderen Gelehrten einer eingehenden Würdigung unterzogen. So wies *Aimé*[102]) bei einer Wellenhöhe von 1,5 m noch eine ziemlich starke horizontale Verschiebung der Wassermassen bis zu einer Tiefe von 14 m nach. Die Versuche, welche er im Hafen von Algier anstellte, ergaben, dass die Wellen in einer Tiefe von 40 m noch ziemlich stark sein können. Bei diesen Beobachtungen handelte es sich allerdings nur um Wogen von höchstens 3 m Höhe, und zudem war *Aimés* Apparat derart construiert, dass er nur ziemlich bedeutende Bewegungen der Wasserteilchen registrierte.[103]) Es unterliegt daher keinem Zweifel, dass die Wirkung der Welle sich noch in beträchtlicheren Tiefen geltend macht, und weitere Untersuchungen bestätigten diese Vermutung. So hat *Siau*[104]) im Nordwesten der Insel Réunion Abdrücke vom Meeresboden genommen und noch in einer Tiefe von 188 m Rippeln konstatiert. Lotungen in grösseren Tiefen machten es wahrscheinlich, dass hier dieselbe Erscheinung sich vorfindet. Da weitere diesbezügliche Angaben von anderen Autoren[105]) vorliegen, so können wir mit Sicherheit an-

---

[102]) Ann. de chim. et de phy. 3. sér. tome V 1842 p. 417 ff. u. Krümmel, Ozean. II. S. 32.

[103]) Ozean. II. S. 31/32.

[104]) Annal. de chim. etc. 3me sér tome II 1841, 118.

[105]) Lyell (El. of Geol. 6 Ed.) hebt hervor, dass grosse Wassermassen bis zu einer Tiefe von 300—450 Fuss aufgewühlt werden, so dass daselbst noch Sand transportiert werden könnte. Nach Delesse (Lithol. du fond des mers 1871 p. 110) findet die Bewegung der Wellen bis zu einer Tiefe von 200 m statt, was wahrscheinlich auch für die Rippeln zuträfe. Nach Krümmel branden Wellen in der Tiefe von 200 m, und nach Cialdi können bis zu derselben Tiefe Sandmassen transportiert werden (Supan, Grundzüge der phy. Erdk. S. 138.); von Richthofen nimmt ebenfalls an, dass die Fortpflanzung

nehmen, dass Rippeln bis zu einer Tiefe von 200 m recht wohl vorkommen können, ohne dass jedoch der Fall ausgeschlossen wäre, dass sie sich auch noch jenseits dieser etwas eng gezogenen Grenze vorfinden. Nach den Gebrüdern *Weber* können sich Wellen bis zu einer Tiefe, welche ihrer 350fachen Höhe gleichkommt, bemerkbar machen. Diese Zahl scheint allerdings etwas zu hoch gegriffen zu sein, und die Theorie wird mit den Vorgängen in der Natur nur dann übereinstimmen, wenn, wie *von Richthofen*[106]) bemerkt, der die Wellenbewegung erzeugende Wind lang genug andauert. Die Kabelverletzungen in einer Tiefe von 12—1800 m hat man ebenfalls auf die Wellenwirkung zurückgeführt.[107]) Dieser Schluss dürfte, falls man keine abnormen Wellen, wie Erdbebenfluten, im Auge hat, wohl etwas gewagt erscheinen. Unbestritten wird bloss die Thatsache bleiben, dass Wellenfurchen bis zu einer Tiefe von 200 m vorkommen. Die Frage, ob sie sich in grösseren Tiefen,[108]) sogar bis zu Tiefen von 12—1800 m bilden, ist noch nicht spruchreif.[109]) Es wird ein diesbezüglicher Beweis auch sehr schwer zu erbringen sein, da in solchen Tiefen die Wellenfurchen sehr klein sein müssten. Die früher besprochenen Versuche ergaben ja, dass die Wellenfurchen

---

der Wellen in Tiefen von 200 m zweifellos erwiesen ist. (Führer f. Forsch. S. 414.)

[106]) Führer f. F. S. 326.

[107]) Oceanogr. 2. Bd. S. 30.

[108]) Geologische Anzeichen, bei denen man von der Voraussetzung ausging, dass bewegungslosen Organismen nur durch die Wellenbewegung Nahrung zugeführt werden könnte, vermögen den Beweis von der Tiefenwirkung der Wellen nicht zu erbringen, da durch die neuesten Untersuchungen festgestellt wurde, dass in allen Tiefen sich bewegungslose Organismen vorfinden. (Ann. d. chim. II, 1841 u. Ocean. II. S. 34)

[109]) Was die unsymmetr. Rippeln, die infolge der Gezeiten entstanden sind, anbelangt, so mag hier auf die früheren Ausführungen hingewiesen werden.

mit zunehmender Tiefe kleiner werden. Falls die Wellenbewegung sich nur bis zu einer gewissen Tiefe bemerkbar macht, muss auch die Amplitude der Orbitalbahnen nach und nach abnehmen, um schliesslich ganz zu verschwinden. Dementsprechend müssen, da ein gewisser Zusammenhang zwischen der Grösse der Rippeln und der Geschwindigkeit[110]) der Oscillation besteht, die Wellenfurchen mit zunehmender Tiefe näher aneinander rücken und niedriger werden, bis die stetig abnehmenden Erhöhungen sich allmählich am Meeresboden verlieren. Die Lotungen *Siaus* beweisen auch, dass der Übergang von den Rippeln zum angrenzenden Flachboden sich langsam vollzieht, falls das Terrain sanft und gleichmässig abwärts fällt. Somit ist es erklärlich, dass auf einem ausgedehnten Terrain, das unter einem gewissen Böschungswinkel einfällt, sich Rippeln von verschiedener Grösse bilden können. Weist der Meeresboden Vertiefungen auf, so können sich grosse und kleine Rippelmarken örtlich concentrieren. Die Wellenfurchen, welche *Hunt* in der Tor Bay beobachtete, bildeten sich in seichtem Wasser, also nahe an der Oberfläche bei mässigem Wellengang. Es ist klar, dass in diesem Falle eine Depression des Bodens die Wirkung der ohnedies schwachen Welle bedeutend abschwächen muss, zumal da die Tiefe der Depression im Verhältnis zu der Entfernung des angrenzenden Bodens von der Oberfläche des Wassers beträchtlich gewesen sein mag.

Über die Grösse der Rippeln, welche in der Natur beobachtet wurden, liegen sehr verschiedene Angaben vor. In der Tor Bay waren sie $1^1/_2$—22 Zoll (ca. 4 bis 56 cm) lang, *Forel* hat Rippelmarken von 5 bis 25 cm Länge, 1—7 cm Höhe, manchmal auch solche

[110]) Die Geschwindigkeit der Bewegung nimmt in der Tiefe, obwohl die Bahnen der Wasserteilchen von diesen in derselben Zeit durchlaufen werden, ab, da die Amplitude sich verringert.

von 40 cm Länge beobachtet. *Siau* hat ihre Distance von Kamm zu Kamm auf 30 –50 cm, ihre Höhe auf 10 – 15 cm geschätzt. Rippeln von $2^1/_2$ engl. Fuss (75 cm) Länge, wie sie *Hunt* bei Kirkcudbright an der Küste Schottlands constatiert hat, besonders aber solche, deren Höhe, wie *John Gilmore*[111]) berichtet, ca. 3 Fuss oder 90 cm gewesen sein soll, dürften seltener vorkommen. Die auf den „Goodwin Sands", nordöstlich von Dover vorgefundenen, von *John Gilmore* beschriebenen Rippeln müssten, wenn wir sie recht steil annehmen wollen, trotzdem noch einige (2—3 m.) Meter lang sein. Daraus ergibt sich, dass die Grösse der unter Wasser gebildeten Rippelmarken sehr verschieden ist.

5) Beziehungen zwischen den Rippelmarken und den terrestrischen Sandanhäufungen.

Die aeolischen Sandgebilde, speziell die Windrippeln und Dünen,[112]) deren Beziehungen zu den unter dem Wasser gebildeten Rippeln nachstehend festgestellt werden sollen, scheinen, was ihre Grösse anbelangt, noch mehr zu differieren. Es mag diese Thatsache zum Teil wohl daher rühren, dass die Unebenheiten, welche das Fundament für derartige Sandanhäufungen liefern, auf dem Lande grösser sind, wie die am flachen Strande, wo durch die Brandungswoge eine sanft verlaufende Abrasionsfläche[113]) geschaffen wird. Der Grösse nach könnte man die hier in Betracht kommenden aeolischen Sandgebilde in grössere stabilere Sandanhäufungen (Dünen) und in kleinere Sandfurchen (Windrippelmarken) unterscheiden, die, sozusagen, plötzlich auftreten, vom Wind

[111]) „Storm Warriors or Lifeboat Work on the Goodwin Sand." S. 109, 215, 222.

[112]) Von anderen Sandanhäufungen, wie beispielsweise von den Sandgletschern, soll abgesehen werden.

[113]) von Richthofen „Führer f. Forschungsreisende" S. 353 ff.

leicht abgeändert, bewegt und zerstört werden können. Was erstere anbelangt, so ist deren Gestalt wiederum ausserordentlich variabel, so dass sich für die verschiedenen Arten dieser Sandablagerungen bereits verschiedene Namen eingebürgert haben. Die Bezeichnung „Dünen" für alle Gebilde dieser Art ist ziemlich allgemein.

In neuerer Zeit wurden bezüglich der Bildung der Dünen und der dabei zu berücksichtigenden Faktoren verschiedene Ansichten laut. Es sollen hier nur die wichtigsten Punkte hervorgehoben werden, welche bei der Entstehung dieser Erscheinung in Frage kommen, und die zugleich einen Vergleich mit der Bildung der unter Wasser erzeugten Rippeln gestatten.

Nach *Walther*[114]) wären für die Bildung der Dünen 4 Faktoren massgebend: die Configuration des Bodens, ferner Kraft, Richtung und Sandgehalt des Windes. *von Richthofen* bemerkt, dass die Einflüsse, welche der Anhäufung des Sandes zugrunde liegen, noch nicht bekannt sind. Hypothetisch wären es: die Grösse und Gestalt der Sandkörner, die Formen der Oberfläche des Untergrundes und die Richtung des vorherrschenden Windes.

Auch nach *Rolland*[115]) kommt das Relief des Terrains für die Sandablagerungen in Betracht, da der mit Sand beladene Wind an einem Hindernisse einen Teil desselben abgibt. *Courbis*[116]) teilt diese Ansicht keines-

---

[114]) „Die Denudation in der Wüste und ihre geologische Bedeutung." Bd. XVI der Abhandlungen der math. phy. Klasse der Kgl. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch. Leipzig 1891.

[115]) Rolland sagt: „Les chaînes des dunes se trouvent surtout en relation avec le rélief du sol" (Bull. Soc. de Géogr. Paris 1886, p. 213.) Rolland: „Les grandes dunes de sable du Sahara" (C. R. Soc. de Géogr. Paris 1890, S. 158—164 und Peterm. Mitt. 37. Litt. 803.)

[116]) Courbis: „Les dunes et les eaux souterraines du Sahara." Ebd.

wegs; er schiebt die Ablagerungen des Sandes der Bodenfeuchtigkeit[117]) zu und führt für diese Behauptung die Thatsache ins Feld, dass die Dünen in ihrem Innern feucht sind. *Rolland* schreibt die Dünenfeuchtigkeit den atmosphärischen Niederschlägen zu, und die Ausführungen *Parrans*[118]) scheinen *Rollands* Ansicht zu bekräftigen. *Zittel*[119]) führt die Wassermassen der artesischen Brunnen in der libyschen Wüste ebenfalls auf atmosphärische Niederschläge zurück, und *Walther* bezeichnet die ziemlich verbreitete Ansicht, dass es in der Wüste an manchen Orten gar nie regne, als irrig. Er betont, dass kein Teil der afrikanischen Wüste absolut regenlos sei, dass die Strichregen zwar selten eintreten, aber dann um so intensiver. Es scheint demnach die Ansicht begründet zu sein, dass die Bodenconfiguration ein wesentliches Moment bei der Bildung der Dünen ausmacht. Für diese und gegen *Courbis'* Annahme spricht ferner die Thatsache, dass Dünen auf absolut trockenem Kalkboden (z. B. die grossen Dünenketten zwischen El Golea und Quardhaia) vorkommen, und der Umstand, dass sich dieselben in ebenem Terrain um Oasen, wie *Blanc*[120]) berichtet, bilden, dürfte doch kaum genügen, um *Zittels*,

---

[117]) Die Bodenfeuchtigkeit unter trockenem Sande bestätigt Wilkinson: „Aus Sicklöchern saugen die Eingeborenen das Wasser durch ein Rohr in die Höhe, und zwar an solchen Stellen, welche an der Oberfläche den Eindruck trockenen Sandes hervorrufen." (Peterm. Mitt. 1892 p. 73.)

[118]) Nach Parran sammeln die Flugsandberge das Regenwasser und lassen es, falls sie auf einer undurchlässigen Schicht ruhen, als Quelle hervortreten („Observations sur les dunes littorales de l'époque actuelle et de l'époque pliocène en Algérie et en Tunisie." Bull. Soc. géol. de France 1890 S. 245—252 und Peterm. Mitt. Bd. 37. Littb. No. 724.)

[119]) Deutsche Rundschau f. Geogr. u. Statistik XIV. Jahrgang S. 13.

[120]) „La formation des dunes sahariennes". (C. R. Soc. de Géogr. Paris 1890 S. 363—372 u. Peterm. Bd. 37 Littb. No. 803.)

Walthers und *Rollands* Bildungsgesetz von dem Einflusse der Bodenconfiguration[121]) auf die Dünenbildung

[121]) Vantonne („Mission de Chadamès" p. 253) weist der Bodengestaltung einen zu grossen Anteil an der Entstehung der Dünen zu, wenn er glaubt, dass jeder Düne ein Berg entspräche. Walther bemerkt ganz richtig, dass die Figuren, welche Vantonne in seinem Werke gibt, doch nur beweisen, dass sich an einem Felsen, ebenso wie an einer andern Unebenheit des Bodens der Dünensand anhäufen kann. Zudem dürfte die Ansicht Vantonnes insofern nicht zu verallgemeinern sein, als von vielen Dünenzügen bekannt ist, dass sie in der Richtung der herrschenden Winde sich langsam fortbewegen. Andererseits fehlt es nicht in der diesbezüglichen Litteratur an Untersuchungen, welche die Dünen als Resultat der Brandungswoge oder der Gezeiten zu deuten suchen. So vermutet Stapff (Verh. d. Vereins für Erdkund, Berl. 1887) für gewisse südafrikanische Dünen trocken gelegte marine Sandbänke, und Bouthillier de Beaumont verleiht dieser Ansicht wenigstens für die litoralen Dünen im südwestlichen Frankreich energischen Nachdruck („Sur les formations des dunes, et son importance comme facies géologique et hydrographique." Archives des sc. phys. et nat. 3^{me} pér, Bd. XVI S. 383 ff.) Nach Beaumont wäre das Zeitintervall zwischen den aufeinander folgenden Gezeiten zu kurz, als dass der Wind imstande wäre, den feuchten, mit Salzwasser durchdrängten Sand zu transportieren. Die Dünen zeigen ausserdem, wie Beaumont hervorhebt, an den Stellen, wo sie von der Eisenbahn durchquert werden, keinen Pflanzenwuchs im Innern, so dass sie nicht auf den Wind, der ohne Hindernis nur die Rolle des Nivelleurs spielen könne, („le vent est uniquemment nivelleur") zurückzuführen sind. Und so schreibt Beaumont der Woge die Bildung der Dünen zu, die als Riffe entstanden seien, jetzt aber als aeolische Gebilde infolge der positiven Strandverschiebung erscheinen. Besonders wären nach Beaumont die Gezeiten massgebend, so dass der Aufbau der ehemaligen Sandbänke, der jetzigen Dünen, auf den Widerstreit zwischen der Flut und den sich in den Ozean ergiessenden Wassermassen der dortigen Flüsse (Garonne und Adour) zurückzuführen wäre. Günther weist (Lehrb. d. phys. Geogr. S. 489. Anm. 1) darauf hin, dass sich Sandhügel auch an der Küste gezeitenloser Binnenmeere vorfinden, und zudem hat Zobrist in einer besonderen Schrift Beaumonts Anschauung bekämpft. Selbstverständlich ist die Anschauungsweise Beaumonts nicht zu generalisieren, er selbst spricht ja auserdem von Dünen, die durch den Wind gebildet und transportiert werden (produites par les remous de vent

umzustossen. Es ist natürlich, dass in diesem Falle der Pflanzenwuchs die Gestaltung des Terrains zu ersetzen vermag.

Unebenheiten, welcher Art sie auch sein mögen, wären demnach bei der Bildung der Dünen massgebend. Es fällt demnach diesem Dünen erzeugenden Faktor dieselbe Aufgabe zu, wie den zufällig an einander haftenden Sandkörnchen, die im Anfangsstadium der Rippelbildung in Betracht kamen. Ihm wäre also dieselbe Bedeutung zuzuweisen, wie dem Metallstreifen in *Forels* Rinne, wie der Röhre im Genfer See, zu der, wie *Forel* constatierte, sich ein System paralleler Rippeln ablagerte. Ebenso lässt die ziemlich häufige Gruppierung der Dünen zu parallelen Ketten den Schluss zu, dass eine Düne zur Entstehung einer weiteren Sandablagerung Veranlassung geben kann. *von Richthofen*[122]) schreibt: „Es könnte sich (an einer zur Windrichtung senkrecht stehenden niederen Bodenterrasse) eine hohe und permanente Düne bilden, welche, gerade wie bei der Küstenumsäumung, das Entstehen paralleler Dünenreihen auf der Leeseite zur Folge haben würde.“ Der dabei in Betracht kommende Vorgang wäre wohl der, dass Sandmassen über den Kamm der Düne transportiert werden, dann aber in einem gewissen Abstande von der Düne in deren Windschatten geraten und in den toten Raum derselben fallen, wo sie sich anzuhäufen beginnen. Die atmosphärische Feuchtigkeit befestigt allmählich derartige secundäre Sandanhäufungen, die sich schliesslich zur

---

deposées par des tourbillons et reprises par lui pour les porter ailleurs“). Für Continentaldünen wäre diese Ansicht ganz unhaltbar, da, wie vielfach berichtet wird, kleinere Dünen sich über Nacht bilden können. Nach Middendorf (Mem. de l'Acad., Imp. de St. Pétersbg. XXIX, 1 p. 33) entstand eine Düne von 25 Fuss Höhe und 80 Fuss Breite in wenigen Stunden, so dass eine Poststrasse verlegt werden musste.

[122]) Führer f. Forschungsreisende S. 444.

Düne auswachsen. Dieser Vorgang erklärt uns die parallele Anordnung der Dünen.[123])

Demnach wäre (nach *v. Richthofen*) die auf der Stossseite des Windes gelegene Düne ihrer Entstehung nach die ältere oder primäre.[124]) Bei den unter fliessendem Wasser gebildeten Rippeln oder Stromdünen wäre nach *Forel* diejenige Rippelmarke die ursprünglichere, welche sich am weitesten stromabwärts befindet. *Forel* beobachtete das Wandern der Wasserdünen mit dem Strome. Da, wo infolge gewisser Bewegungsverhältnisse sich eine Düne gebildet hat, wird, nachdem diese stromabwärts gewandert ist, eine zweite unter denselben Bedingungen an demselben Orte erzeugt werden. Diese wird wieder weitertransportiert, es bildet sich eine dritte, vierte u. s. w.[125]) *Forels* Ansicht ist jedoch nicht unter allen Umständen haltbar; denn es können sich im Rinnsal eines Baches an verschiedenen Stellen gleichzeitig Rippeln bilden. Streckenweise, wenn nämlich das Gefäll

[123]) Nach Walther sind Dislokationen in der Wüste zwar ziemlich häufig; es brauchen dieselben jedoch nicht (nach Walther) zur Erklärung paralleler Dünenzüge herangezogen zu werden.

[124]) Auf der Luvseite kann sich eine neue Düne weniger leicht bilden als auf der Leeseite. Es mag wohl sein, dass ein mässig starker Wind nicht imstande ist, die Sandkörner auf der Luvseite einer bereits gebildeten Düne emporzurollen. So könnte sich allerdings am Fusse derselben auf der Stossseite des Windes eine kleinere Sandablagerung bilden, die aber durch stärkere Winde bald wieder hinweggefegt würde, falls sie noch nicht fest geworden. Die Leeseite dagegen scheint die Bildung weiterer Dünen eher zuzulassen; denn auch bei heftigeren Stürmen liegen die noch nicht erhärteten Sandanhäufungen im Windschatten der primären Düne.

[125]) „Les mêmes actions, se répétant aux mêmes places, si par le fait du relief du fond, une dune s'est développée à un point donné, il s'en formera une seconde au même endroit quand, par suite du déplacement normal de la dune, la première aura descendu le fil du courant. Il y aura donc formation d'une série de dunes semblables, equidistantes, se succédant de haut en bas du courant, les plus anciennes étant les plus bas dans le sens du courant.

zu stark wird, bilden sich gar keine Rippelmarken; die auf der Leeseite sich befindliche Rippelmarke wird alsdann, falls sie bis dahin vorgerückt ist, fortgerissen und zerstört; der sie bildende Sand wird zuerst später wieder, wenn die Stromgeschwindigkeit nachgelassen hat, bei der Bildung einer neuen Rippelmarke beteiligt sein, also eine verhältnismässig ganz junge Rippel aufbauen. So kann es vorkommen, dass die weiter seewärts gebildeten Rippeln die jüngeren sind. Dieser Fall tritt natürlich nur dann ein, wenn die parallel sich an einander reihenden Rippeln eine Unterbrechung erfahren, ausserdem behält *Forels* Ansicht ihre Giltigkeit.

Die Rolle nun, welche bei der Erzeugung der Rippeln der Welle mit ihren alternierenden Bewegungsarten oder auch dem permanenten Strome zufällt, wäre bei der Dünenbildung dem Winde[126]) zuzuschreiben. Je nach der Richtung des Windes, ob derselbe fast das ganze Jahr hindurch dieselbe Richtung beibehält, oder

[126]) In neuester Zeit wurde der transportierenden Thätigkeit des Windes in der innerasiatischen Wüste bezüglich des Sandes durch von Richthofen Rechnung getragen. Ausserdem führt Walther eine Reihe von Beweisen und Zeugnissen für die forttragende Wirkung des Windes in seinem genannten Werke an, und Brackebusch sucht die mächtigen Flugsandablagerungen in den Hochthälern von Antofagasta auf Fallwinde zurückzuführen. (Ueber die Bodenverh. des nordwestl. Teiles der arg. Republ. mit Bezugnahme auf die Vegetation", Peterm. Mitt. 1893 S. 153). Siehe ferner: Deutsche Rundschau f. Geogr. u. Stat. 12. Jahrg. S. 148. In den arkt. Gegenden äussert sich diese Wirkung des Windes insofern, als er ungeheuere Mengen von Schnee, der wegen der niederen Temperatur sich nicht verdichten kann, nach den südl. Gegenden entführt, so dass daselbst zur Zeit des Schneeschmelzens eine Temperaturerniedrigung stattfindet: „La quantité d'eau déplacée à l'état gelé dans ce courant doit être comparable à la masse d'eau des plus grands fleuves de la terre et jouer . . . . un rôle assez grand pour attirer l'attention des météorologistes." (Arch. phys. etc. Bd. XV. S. 523—533, „Sur le Chasse-Neige dans les régions arctiques" von Andrée). Siehe ferner: Deutsche Rundschau f. Geogr. und Stat. 12. Jahrg. S. 473.

bald in dem einen, bald in dem andern Sinne weht, wird die Gestalt der Dünen variieren. Daher kommt es, dass diese teils den unsymmetrischen, teils den symmetrischen Rippeln mehr oder minder ähneln. So hat *Forel* Dünen beobachtet, die infolge der alterierenden Luftbewegungen mehr den Charakter der symmetrischen Rippeln verrieten (bei Cette und am Cap Brescou am Mittelmeer, am atlantischen Ocean bei Bayonne und Arcachon und am Genfer See), andererseits auch wieder solche, welche mehr mit den Wasserdünen zu vergleichen waren (an der Mündung des Adour und bei Biarritz am atlantischen Ocean). Diese Art (ungleiche Seiten und Winkel) ist wohl die gewöhnlichere, da für einen bestimmten Ort eine bestimmte Windrichtung in der Regel die vorherrschende ist. An der Küste wechselt der Wind allerdings, indessen ist doch zu berücksichtigen, dass der Seewind, dem sich keine Hindernisse entgegenstellen, an Intensität den Landwind übertrifft, der doch durch die Bodenconfiguration, durch die Kulturanlagen bedeutend geschwächt werden muss. Wie bei den Rippeln im fliessenden Wasser der sanft geneigte Abhang stets der Luvseite entspricht, ebenso zeigt die Düne auf der Stossseite des Windes eine längere Seite mit kleinerem Einfallswinkel gegen den Horizont. Die Leeseite ist dagegen, wie bei den Rippeln, die kürzere und steilere.[127]) Demnach wäre die Gestalt der Dünen wesentlich von der Richtung der vorherrschenden Winde abhängig.[128]) An der Küste würde ihre flache Seite nach dem Meere zeigen.

[127]) Siehe: Sievers Afrika S. 178, Günthers „Geophysik" Bd. II S. 472 und „Lehrbuch der physik. Geogr. 1891", S. 490, von Richthofens „Führer f. Forsch.", S. 445.

[128]) Nachtigal führt die Dünenketten der Sahara auf den Nordostpassat zurück, und Zittel schloss aus der Thatsache, dass die Richtung der Dünen mit der der heute vorherrschenden Winde nicht in Einklang gebracht werden kann, auf ein höheres Alter dieser Gebilde. (Deutsche Rundschau f. Geogr. u. St. XIV. Jahrg. S. 13).

Ganz regelmässige Dünen kommen nun überaus selten vor; denn die Form der terrestrischen Sandanhäufungen ist nicht nur, was ihre Seiten und Böschungswinkel anbelangt, unsymmetrisch, sondern sie zeigt gewöhnlich keinen geradlinigen sondern einen oval gestalteten Kamm. Es ergeben sich zudem fast alle Unregelmässigkeiten, wie bei den Rippeln, die unter fliessendem Wasser gebildet werden. Im allgemeinen verlaufen diese senkrecht zur Stromrichtung; es kommen indessen auch Rippeln vor, welche dem Strome parallel gerichtet sind. Ein Zweig oder ein Stein war, wie wir gesehen haben, die Ursache dieser Erscheinung. In der Nachbarschaft eines solchen Hindernisses fanden sich keine Rippeln vor, da die Stromgeschwindigkeit zu heftig war; auf der Leeseite desselben konnte allerdings ein Streifen Sand, der in der Richtung des Stromes zog, infolge der weniger energischen Bewegung des Wassers hinter dem Hindernisse zur Ablagerung gelangen. Sobald dieses aber entfernt wurde, verschwand die Sandanhäufung.

Walther hat derartige Erscheinungen in der Wüste ebenfalls beobachtet. Er legt diesen aeolischen Gebilden den Namen „Neulinge“ bei. Es ergibt sich, dass die Neulinge, da das Gebüsch stets auf der Luvseite steht, auf den verschiedenen Seiten verschieden aussehen. Sobald die den Neuling bildende Pflanze (die Tamariske oder der Ethel)[129]) abstirbt, verschwindet auch jener, so dass wir hier dieselbe Erscheinung zu verzeichnen hätten, wie bei der obigen, in der Stromrichtung verlaufenden Sandablagerung.

Den Übergang von den Neulingen zu den geradlinigen Dünen, die senkrecht zur vorherrschenden Windrichtung stehen, bilden die Barchane oder Bogendünen, die auf beiden Seiten mit dem Winde ziehen, in der

[129]) Nach Nachtigal (Peterm. Ergänzh. XXV p. 12).

Mitte dagegen zu jener senkrecht verlaufen. Die Barchane (Barkhane) sind nach *Muschketow*[130]) die verbreitetste und am meisten charakteristische Dünenform für alle Wüsten. Der Grundriss des Barchans ist oval, nähert sich aber mit zunehmender Grösse dem Kreise. Nach *Middendorf*[131]) ist sein Grundriss nicht ganz genau hufeisenförmig, da die beiden Seiten eines Hufeisens nahezu parallel verlaufen, während die seitlichen Ansätze der Bogendüne stark divergieren und einen Winkel von circa 90° bilden.[132]) Die Luvseite ist weniger steil und convex gekrümmt, ihr Böschungswinkel beträgt 15 bis 20°.[133]) Die concave Leeseite ist indessen sehr steil, so dass ihr Böschungswinkel 30—80° beträgt.[134]) Die flache Seite ist demnach bei den Bogendünen gewöhnlich[135])

---

[130]) Physik. Geol. 2 Bd. Petersbg. 1888. Deutsche Rundschau f. Geogr. u. Stat. 12. Jahrg. S. 147.

[131]) „Einblicke in das Ferghanaland". Mém. de l'Acad. Imp. St. Petersbourg XXIX, 1881 I, p. 30 f.

[132]) Siehe Fig. 81 S. 444 in „Führer f. Forsch."

[133]) Nach Muschketow 5—12°, höchstens 17°.

[134]) Nach Middendorf 60°, nach Meyen („Reise der Prinzessin Luise II. p 43) 15—80°, nach Muschketow würde der Abfall auf der Leeseite dem wirklichen Böschungswinkel des Sandes entsprechen und ungefähr 30—40° betragen.

[135]) Höchst selten scheint eine Ausnahme von dieser Regel stattzufinden. „Aber die Form der Barchane verändert sich sehr auf unebenen, wenn auch nur flachhügeligen Flächen," schreibt Muschketow. So treten zuweilen im Archangelschen Gouvernement Barchane auf, die sehr stark von der normalen Form abweichen, indem ihre kurze Seite dem Winde zugekehrt ist. Es mag sein, wie Muschketow andeutet, dass bei derartigen Gebilden vor allem die Bodengestaltung (wie wir solches auch von den Rippeln constatieren konnten) massgebend ist. In den Fuldjes, Vertiefungen von Hufeisenform, deren Boden aus festem Gestein besteht, wie Lady Blunt (a pilprimage to Nedj II p. 242 f.) berichtet, sieht Walther ebenfalls Bogendünen, deren Sand nur durch aussergewöhnlich heftige Stürme bewegt wird, so dass er sich demgemäss bei den Fuldjes anders anordnet, wie der gewöhnliche Dünensand. Er gründet diese

dem Winde zugewandt. Zunächst bildet sich da, wo ein Strauch als Sandfänger dient, eine Sandanhäufung. Der Wind wird später in der Nähe des sich vergrössernden Hindernisses nach *Middendorf* geteilt, so dass er auf beiden Seiten eine Landzunge anfegt. Durch den Druck des Windes auf der Luvseite des Barchans wird diese immer mehr verdichtet, während man auf der Leeseite knietief in den lockeren Sand einsinkt. Der Barchan würde demnach beide Eigenschaften, sowohl die der geradlinigen Düne, die senkrecht zur Windrichtung steht, als auch die der Neulinge in sich vereinigen.

Derartige bogendünenartige Gebilde sind unter fliessendem Wasser ganz allgemein. Es treten daselbst allerorts[136]) Rippeln auf, die, was ihren Grundriss anbelangt, die Gestalt kleiner Wasserbarchane[137]) haben. Der Unterschied ist jedoch der, dass die flach verlaufende Luvseite zuweilen convex, meistens aber concav gegen den Strom gekrümmt ist, während die convexe Seite bei den Barchanen stets der Stossseite des Windes entspricht. Ist der Strom in der Mitte einer wandernden Rippelmarke stärker als zu beiden Seiten, so wird die Rippelmarke in diesem Teile rascher vorwärts schreiten, so dass die beiden Seiten zurückbleiben. Die Rippelmarke wendet alsdann die concave Seite dem Strome zu, was wohl das gewöhnlichere sein dürfte. Zeigt die Rippelmarke dagegen eine convex gekrümmte Luvseite,

---

seine Ansicht auf die Thatsache, dass die Fuldjes parallel zu den benachbarten Dünenreihen von Aalem und Hail laufen, so dass also dem Winde die Hauptrolle zugewiesen werden muss, nicht aber der Thätigkeit des Wassers, wie Lady Blunt meint, oder der complicierten Gestaltung des Terrains, wie Euting anzunehmen geneigt ist. (Verh. d. V. für Erdk. Berlin 1886, p. 267. S. die „Denudation in der Wüste etc." S. 164 ff.

[136]) Wenigstens im Rinnsal des Kaltenbrunner Baches.

[137]) Die Wasserbarchane sind sehr unregelmässig.

so lässt eine derartige Erscheinung auf die entgegengesetzte Bewegungsart oder auf Unebenheiten im Rinnsal des Baches schliessen.

Wenn somit die unter fliessendem Wasser gebildeten Rippeln und die Dünen in Bezug auf ihre horizontale Gestaltung vielfach einander ähneln, da beide geradlinig verlaufen oder auch gebogen sein können, wenn sie andererseits, was ihren vertikalen Querschnitt betrifft, eine unsymmetrische Form aufweisen, so darf doch nicht übersehen werden, dass gerade die vertikale Gestaltung beider Gebilde merkliche Unterschiede zeigt. Die unter fliessendem Wasser gebildeten Rippeln zeichnen sich in der Regel durch einen scharfkantigen Gipfel aus. Die Bogendüne dagegen ist am Gipfel gewölbt, ihre Luvseite erscheint zuerst schwach nach unten gekrümmt, um in die Wölbung nach oben überzugehen, die dann den grösseren Teil des auf der Leeseite gelegenen Abhangs charakterisiert. Bei den geradlinigen Dünen beobachtet man gewöhnlich eine allmählich ansteigende convex gekrümmte Luvseite und eine nach oben concav gestaltete Leeseite. Oft sind die beiden Seiten durch einen scharf eingeschnittenen Grat von einander getrennt. Dieser Grat bildet am Gipfel einen steilen Absturz, der nach *Richthofen*[138]) bei den Barchanen 60°, bei den Dünen der Libyschen Wüste fast 90° beträgt und circa 2—3 m. hoch ist. *Muschketow* hat nun aus der Gruppierung der Sandwellen, welche auf der Stossseite des Windes auftreten und in der Mitte des Barchans senkrecht, auf den beiden Seiten aber parallel zur Windrichtung verlaufen, geschlossen, dass der Wind in der Nähe der Oberfläche des Abhangs sich zerteilt und die Höhe des Barchans umfliesst. Diese Vermutung wird

[138]) „Führer f. Forsch." S. 445. — Jordan und Muschketow haben nebst Walther derartige Einschnitte constatiert. Siehe Nachtigal: „Sahara und Sudan" II., pag. 68.

nach *Muschketow* ausserdem durch die Bewegung der Sandteilchen auf der Leeseite bestätigt. Sobald sich der Wind erhebt, steigen am Gipfel des Barchans Sandwolken empor, welche diesem das Aussehen eines rauchenden Vulkans verleihen. Ebenso berichtet *Zittel,*[139]) dass der Wind zuweilen feinen Sand am Kamm der Dünen emporwirbelt. Es muss sich daher, wie bei den Rippelmarken auf der Leeseite ein Wirbel in Kraft tritt, dem am Abhange der Düne emporstrebenden Windstrome eine 2. Luftströmung entgegenstellen, die ohne Zweifel durch erstere erzeugt wird und als Compensationsstrom zu betrachten ist.[140]) Da, wo sich am Gipfel einer Düne die beiden Luftströme vereinigen, wird der Staub in die Höhe getrieben. Der Compensationsstrom ist jedenfalls die Ursache, weshalb ein Einschnitt oder ein jäher Absturz am Gipfel der Düne zur Ausbildung gelangt. Er ist imstande durch Erosion einen steilen 2 bis 3 m. hohen Absturz zu gestalten, so dass erst unterhalb desselben der Sand, seinem natürlichen Böschungswinkel entsprechend, zur Ablagerung gelangen kann. So lässt sich auch (nämlich durch die Wirkung eines Compensationsstromes oder -wirbels) die Thatsache erklären, dass wie *Ehrenberg*[141]) berichtet, der Sandwall auf der Luvseite von der Pflanze oder dem Hindernisse

---

[139]) Peterm. Mitt. Bd. 20. S. 185.

[140]) Man kann sich von dem dabei in Betracht kommenden Vorgang leicht überzeugen, wenn man hinter einen Gegenstand, etwa hinter ein Buch (auf der Leeseite) feinen Sand oder auch Asche streut und dieselbe von der entgegengesetzten Seite (Luvseite) wegzublasen sucht. Die Asche wird sich dem Hindernisse nähern. Dies ist ein Beweis dafür, dass der Luftstrom auf der Luvseite eine zweite Strömung auf der Leeseite erzeugt, die ersterem entgegenwirkt.

[141]) „Beitr. zur Char. der nordafr. Wüsten". Ak. d. Wiss. Berlin 1827 p. 17.

durch einen Zwischenraum getrennt ist, der sich niemals ausfüllt.[142])

Somit haben die Dünen und die unter fliessendem Wasser gebildeten Rippeln in Bezug auf ihre Entstehung und Form manches gemein, wiewohl sie nicht in allen diesbezüglichen Punkten mit einander übereinstimmen. Beide Gebilde gleichen ausserdem noch insofern, als beide ihren Ort nach und nach verändern. Bezüglich der Dünen scheinen die Meinungen in diesem Punkte auseinander zu gehen. So wird einerseits behauptet, dass die Dünen ihren Ort beibehalten,[143]) andererseits werden evidente Beispiele für die Veränderlichkeit der Dünen und ihre Bewegung angeführt. Man wird wohl das Richtige treffen, wenn man mit *Walther* und *Muschketow* der Meinung ist, dass ein Teil der Dünen beweglich ist, während einem andern Teile derselben eine gewisse Stabilität nicht abzusprechen ist. Kleinere Dünen, die plötzlich entstehen können, werden rascher wandern wie grössere, die bereits einige Festigkeit erlangt haben. Ein fester Kern, der beispielsweise auf Verwerfung der Oberflächenschichten oder auch auf innere Feuchtigkeit zurückzuführen wäre, oder eine festere Verkittung der einzelnen Schichten unter dem Einflusse von atmosphärischen Niederschlägen mag wohl geeignet sein, eine stabilere Düne zu schaffen. Pflanzen, die im Innern der Düne bald absterben, erzeugen weniger permanente Dünen.

---

[142]) Siehe Günther „Geophysik" Bd. II, Fig. 88 S. 472 oder „Lehrbuch d. phy. Geogr." Fig. 164 S. 490.

[143]) Walther führt in seinem citierten Werke eine Reihe von Zeugnissen an, die für beide Thatsachen, sowohl für die Stabilität als auch für die Beweglichkeit der Dünen zu sprechen scheinen. Siehe ferner: Peterm. Mitt. Bd. 32, S. 313; Bd. 37 Litteraturb. Nr. 759 u. 803 c.; Bd. 38 Litteraturb. Nr. 710; Bd. 39 Litteraturb. Nr. 227; Weule, Zeitschr. f. wiss. Geogr. Bd. VIII u. Deutsche Rundschau f. Geogr. u. Stat. XII. Jahrg. S. 150 f.

Der Vorgang, welcher sich beim Wandern der Dünen abspielt, mag wohl am besten an den Windrippeln zu constatieren sein. Dieselben können als kleinere Dünen[144]) betrachtet werden, die rasch entstehen (nach *Lyell* in 10 Min.), rasch wieder abgeändert oder auch zerstört werden.

Aus den Beobachtungen von *John Rae*[145]) bei

---

[144]) Die Grösse der Dünen beträgt im allgemeinen einige Meter bis 200 m. Nach Muschketow sind die Barchane in der Sahara 150—300 m hoch, und nach Largeau (Peterm. Mitt. Bd. 39 Litteraturb. 227) sollen die Sandanhäufungen bei Ghadames eine Höhe von 500 m erreichen. Die Windrippeln sind nach Mellard-Reade im Maximalfalle 9 engl. Zoll von einander entfernt und erreichen eine Höhe von $1^1/_2$ Zoll, die von J. Rae beobachteten Rippeln waren nur 3 Zoll lang und ca. $^3/_4$ Zoll hoch. Nach Walther würde die Breite der Windrippeln zwischen 2 cm u. 1 m variieren. Walther nennt sie Miniaturdünen. Ihre Entstehung würden die Windrippeln nicht den Pflanzen, sondern zufällig an einander haftenden Sandkörnern oder unbedeutenden Unebenheiten in erster Linie verdanken. Dabei würden nach Lyell, wie bei den, in der Wellenrinne erzeugten Rippeln zunächst kleinere Sandanhäufungen (Sandflecken) gebildet werden, die später zusammenwachsen und eine Rippel bilden. Ihre Länge wäre theoretisch von der Stärke des Windes, der Korngrösse und dem spec. Gewichte des Sandes abhängig. Lyell schreibt: „The restoration began by the appearance here and there of small detached heaps of sand, which soon lengthened and joined together, so as to form long sinuous ridges with intervening furrows."

[145]) John Rae schreibt: „The farward movement of the ripples was evidently caused by sand being drifted from the weather sides, and deposed on their lee, and thus there was a progressive movement to leeward, more or less rapid according to the increase or diminution of the wind force." Diese von Rae beobachteten Sandrippeln befanden sich 20—30 Fuss über dem Niveau des höchsten Wasserstandes (above high-water-mark) und wurden demgemäss vom Winde allein, ohne Einfluss der Meereswogen erzeugt. Es scheint nun ein Versehen vorzuliegen, wenn Günther (Lehrb. d. phys. Geogr. S. 295, Anm. 2) hinzufügt, dass sich diese Rippeln „in geologischer Vorzeit" gebildet hätten. Die von Rae beobachteten Rippeln wanderten, wie erwähnt, unter dem Einflusse des Windes

Bundoran an der irländischen Küste und *Lyells*[146]) Wahrnehmungen bei Calais ergibt sich, ebenso wie aus denjenigen *Forels* — letztere an fluviatilen Rippelmarken angestellt — dass auf der Luvseite Sandkörner entfernt werden, die auf der Leeseite wieder zur Ablagerung gelangen. *Forel* nennt daher die Luvseite „face d'érosion", die Leeseite „face d'alluvion" Beim Wandern der Windrippeln ereignet es sich zuweilen, dass, obwohl die Rippeln im allgemeinen (nach *Rae*) ihre Gestalt beibehalten, einzelne derselben schneller vorrücken, so dass sie, wie *Lyell* berichtet, die vorhergehenden einholen. Auf diese Weise kommt es zu einer Verästelung oder Bifurkation der einzelnen Rippeln, wie solche auf dem Sandstein häufig beobachtet wird.

Was nun die Gestalt der Windrippeln anbelangt, so ähnelt diese den fluviatilen Rippelmarken in vielfacher Beziehung. Bei jenen fällt dem Winde dieselbe Rolle zu, wie dem permanenten Wasserstrom bei der Bildung der im Rinnsal fliessender Gewässer sich vorfindenden Rippeln. Demgemäss ist, wie auch *Lyell* berichtet, die Luvseite weniger steil als die Leeseite. Jene wird sich schon deswegen nicht so schroff gestalten, da dem Winde sonst eine allzu exponierte Fläche[147]) dargeboten würde,

---

ungefähr 1 Fuss weit in 3—4 Minuten und waren demgemäss frisch gebildet und nicht fossil.

[146]) Lyell schreibt: „The mode of advance was by the continual drifting of grains of sand up the slopes a b and c d (a b und c d Luvseiten), many of which grains, when they arrived at b and d (b und d Kämme) fell over the scarps b c and d e (b c und d e Leeseiten) and were under shelter from the wind; so that they remained stationary, resting, according to their shape and momentum, on different parts of the descent, and a few only rolling to te bottom. In this manner each ridge was distinctly seen to move slowly on as often as the force of the wind augmented."

[147]) Führer f. Forsch. S. 436: „Eine der Windrichtung entgegengesetzte Neigung des Bodens ist ihr (der Ablation) förderlich, weil der Stoss zu vollerer Geltung kommt."

ein Umstand, der die Zerstörung der Rippeln zur Folge hätte. Die Luvseite wird vielmehr der Richtung des Windes möglichst parallel werden, da dieser die Ausbildung eines schroffen Absturzes auf der Luvseite aus obigem Grunde nicht gestattet. Die Leeseite der Windrippeln muss, wie die der Dünen in der Nähe des Kammes oder wie die der fluviatilen Rippeln, einen steilen Absturz infolge der erodierenden Wirbelbewegung aufweisen. Weht nun der Wind aus der entgegengesetzten Richtung, so wird die Luvseite der Windrippel sofort zur Leeseite umgebildet und umgekehrt, so dass beide Seiten ihre Längen rasch vertauschen; wenn der Wind nur 10 Minuten braucht, um aeolische Rippeln zu erzeugen, so ist er sicherlich noch eher imstande, bereits vorhandene Rippelmarken umzugestalten. Die in der Wellenrinne erzeugten Rippeln beweisen ja, dass bei jeder Phase der Oscillation Luv- und Leeseite mit einander (in Bezug auf ihre Länge) wechseln.

Die im Meere oder in den Binnenseen entstandenen Rippeln sind nun regelmässig. Es ist daher, da *Walther* zahlreiche marine und aeolische Rippeln beobachtet hat, um so auffallender, dass er trotz eingehender Untersuchungen[148]) den Unterschied zwischen beiden Arten nicht zu constatieren vermochte. Nach *Walther* „kommt den Windrippeln eine sehr verschiedene Gestalt zu; sie sind bald scharfkantig, bald rundlich im Querschnitt, oft ziehen sie in langen Linien einander parallel, oder sie verzweigen sich, so dass man alle Typen sympodialer und dichasialer Verästelung beobachten kann.“ *Walther* geht jedoch nicht auf die Frage ein, ob aeolische Rippelmarken bezüglich ihrer Seiten und Böschungswinkel symmetrisch oder unsymmetrisch sind. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass er diesbezüglichen Beobachtungen

[148]) wie Walther versichert.

ferne stand.[149]) Wir müssen daher mit *Lyell* und nach allem, was uns von den fluviatilen Rippeln und Dünen bekannt ist, annehmen, dass die aeolischen Rippelmarken den Dünen und den im fliessenden Wasser erzeugten Rippeln ähnlicher sind als den Wellenfurchen. *Walther* ist nun der Ansicht, dass fossile Rippelmarken keine specifische Wassererscheinung[150]) sind. Sie können vielmehr aeolischen Ursprungs sein, gerade wie Schichtenbildungen nicht immer eine dereinstige Wasserbedeckung zur Voraussetzung haben. So berichtet *Froschhammer*[151]) von der Schichtung der Dünen an der Küste Jütlands und hebt hervor, dass nicht jede Schichtung das Resultat einer Wasserbedeckung[152]) zu sein braucht.

Es darf demnach aus dem Vorhandensein von Rippeln allein keineswegs eine dereinstige Wasserbedeckung gefolgert werden. Bei Beurteilung dieser Gebilde wird (ausser anderen geologischen Anzeichen) vielmehr die Gestalt der Rippeln und die Verteilung der Sandkörner in Berücksichtigung zu ziehen sein. *Walther* und *Stapff*[153]) berichten nämlich, dass sich die gröberen

---

[149]) Walther nennt die Windrippeln übrigens „Miniaturdünen." Wenn diese Bezeichnung richtig ist, so müssen, auch nach Walther, derartige Gebilde verschiedene Seiten und Böschungswinkel aufweisen.

[150]) „Ich erwähne das, weil häufig die Anwesenheit von Rippelmarken auf Sandsteinflächen als ein Beweis für marine Bildung angesehen wurde; ein solcher Schluss ist unzulässig."

[151]) Neues Jahrb. f. Mineral. 1841 p. 7.

[152]) Auch Middendorf, Walther u. a. konstatierten bei den Dünen verschiedene Schichten, die auf die verschiedene Windstärke zurückzuführen wären. Zuweilen kommt es vor, dass solche Schichten von einer Staubschicht überzogen werden, die dann unter dem Einfluss von atmosphärischer Feuchtigkeit verhärtet.

[153]) Stapff schreibt: „Der schwere Sand nimmt immer die Kämme, der leichtere die Vertiefungen der Windrippeln ein" (cit. b. Walther). Es ist dabei wohl anzunehmen, dass sich die Windrippeln zuerst aus grobem Sand gebildet haben, und dass sie später von feinerem Flugsand teilweise bedeckt wurden.

Sandkörner zuweilen am Kamme der Rippeln ablagern, was nach den Wahrnehmungen *de Candolles* und *Forels* bezüglich der fluviatilen und marinen Bildungen nicht der Fall ist. Ebenso haben die Experimente derselben ergeben, dass die schwereren Sandkörner stets unten, die leichteren am Gipfel zur Ablagerung gelangen. Im Kaltenbrunner Bache habe ich die grösseren Körner sehr oft auf der Leeseite der Wasserdünen zu konstatieren vermocht. Zahlreiche Proben ergaben dies. Gröbere Körner können auf der flach geneigten Luvseite gerade noch emporgetragen werden, und wenn sie dann auf der Leeseite abwärts rollen, bleiben sie liegen, da der Wirbel daselbst nicht kräftig genug ist, um sie auf der fast senkrecht abstürzenden Leeseite emporzurollen; kleinere Körnchen werden weniger leicht in den Wirbel auf der Leeseite fallen. Sie können, falls sie sich dennoch auf der Leeseite ablagern sollten, durch den Wirbel daselbst gehoben und dann durch den Hauptstrom weiter transportiert werden, so dass die Leeseite hauptsächlich den Sammelort für gröbere Sandkörner repräsentiert. Die Luvseite zeigt sowohl grobe wie feine Körner, die beiderseits mit der ihrer Grösse und ihrem Gewichte zukommenden Geschwindigkeit die Luvseite emporzurollen suchen.

Was die Form der Rippelmarken anbelangt, so weist diese bezüglich der Bildung des Kammes keinen durchgreifenden Unterschied zwischen den verschiedenen Rippeln auf. Die Windrippeln *Lyells* waren oben scharfkantig, die *Walthers* dagegen bald flach, bald kantig. Bei den im Wasser frisch gebildeten Rippeln sind die Gipfel, wie *Darwin* berichtet, scharf. *Forel* und *Hunt* bestätigen diese Thatsache und fügen hinzu, dass mit zunehmendem Alter der Rippeln deren Kämme sich verflachen.[151]) Daher bietet die Gestaltung und Form des

[151]) Bei den trocken gelegten und fossilen Rippeln zeigt das

Gipfels kein Merkzeichen für die Entstehungsweise der Rippeln.

Auf Grund dieser Betrachtung gelangen wir zu der Überzeugung, dass das blosse Vorhandensein von fossilen Rippeln noch keinen Schluss betreffs der sie bildenden Agentien zulässt. Eine diesbezügliche Folgerung mag aus dem Verhältnis der beiden Seiten zu ziehen sein. Es wird nämlich wahrscheinlich sein, dass vollkommen regelmässige[155]) fossile Rippelmarken marine Bildungen sind. Unsymmetrische Gebilde dieser Art können marinen, fluviatilen oder auch aeolischen Ursprungs sein. In diesem Falle wäre zu untersuchen, ob die betreffende Erscheinung in dem ehemaligen Rinnsal eines Flusses sich vorfindet, ob Erosionserscheinungen eine fluviatile Bildung wahrscheinlich machen, oder ob das Terrain, auf dem diese ungleichmässigen Rippeln vorkommen, frei ist von den Spuren des fliessenden Wassers. Wenn keine Erosionsspuren nachzuweisen sind, so könnten die unregelmässigen Rippeln immer noch auf die Gezeitenströme oder auf den Wind zurückzuführen sein. Es wäre dann die Verteilung des Sandes, wenngleich diese nur einen Wahrscheinlichkeitsschluss gestattet, heranzuziehen und zu untersuchen, ob die schwereren Körner bisweilen oben oder vorzugsweise unten und auf der Leeseite ehedem zur Ablagerung gelangten. Rippelmarken allein können uns aber kaum zu der Annahme berechtigen, dass gewisse Sedimente entweder marinen, fluviatilen oder aeolischen Ursprungs sind, daher werden wir

---

Thal gewöhnlich eine scharfe Rinne, während der Kamm flach erscheint. Das Thal bildet einen natürlichen Abzugskanal für fliessendes Wasser, das eine derartige Rinne auszuhöhlen strebt. So kann man nach Geikie den Abdruck einer ursprünglichen Rippelmarke von dem Original unterscheiden, da bei jenem eine kleine Kante auf dem Gipfel sich vorfindet, die der Rinne im Thale des letzteren entspricht (Man. of Geol. v. Jukes and Geikie III. Ed. p. 172.

[155]) mit gleichen Seiten und Böschungswinkeln.

bei der Feststellung der Bildungsarten von Sedimenten stets auf andere geologische Anzeichen angewiesen sein.

Zum Schlusse mag, wie § 7 der Promotionsordnung der philosophischen Fakultät zu Giessen vorschreibt, der Lebenslauf des Verfassers vorstehender Arbeit folgen. Derselbe wurde am 24. April 1866 zu Grünstadt in der Pfalz geboren. Er besuchte vom 6. bis 10. Lebensjahr die Volksschule in Frankenthal, um dann in das dortige Real- und Lehrinstitut seines Vaters einzutreten, das er im Jahre 1882 absolvierte. Da er lateinischen Privatunterricht erhalten hatte, war es ihm möglich, in demselben Jahre in die Obersekunda des Realgymnasiums zu Speier einzutreten. Verfasser setzte 1883 seine vorbereitenden Studien an der gleichen Anstalt zu Würzburg fort und absolvierte das dortige Realgymnasium im Jahre 1885. Er bezog alsdann die Universität und technische Hochschule zu München, um Mathematik und Physik zu studieren, wandte sich jedoch nach Verlauf von drei Semestern dem Studium der deutschen Sprache, Geographie und Geschichte zu. Im Jahre 1887/88 besuchte derselbe die Universität zu Heidelberg, kehrte dann nach München zurück und beteiligte sich im Herbste des Jahres 1890 mit Erfolg an der Lehramtsprüfung für deutsche Sprache, Geographie und Geschichte. Ende Januar des nächsten Jahres wurde Verfasser zum Assistenten an der Kgl. Realschule zu Rothenburg a/T. ernannt. Im April 1892 erfolgte seine Anstellung als Lehramtsverweser an der Kgl. Realschule zu Neustadt a/H., an welcher Anstalt er im August 1893 zum Kgl. Reallehrer befördert wurde. Verfasser ist seitdem als Lehrer der deutschen Sprache, Geographie und Geschichte an dieser Schule thätig.